



Universidad
Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES MODALES DE UNA RUEDA FERROVIARIA CON GRIETAS

AUTOR: RUBÉN GARCÍA ANTÚNEZ

TUTOR: Dr. HIGINIO RUBIO ALONSO

COTUTOR: ZOSER KALENGAYI TSHILUMBU

Leganés, Octubre 2013

Título: Análisis de las variaciones modales de una rueda ferroviaria con grietas.

Autor: Rubén García Antúnez

Tutor: Dr. Higinio Rubio Alonso

Cotutor: Zoser Kalengayi Tshilumbu

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del proyecto Fin de Carrera el día ____ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

RESUMEN

El presente proyecto, “Análisis de las variaciones modales de una rueda ferroviaria con grietas”, tiene por objeto principal el modelado y análisis modal de una rueda ferroviaria sin grieta y con grieta para ver las diferencias en los modos de vibración, a través del software Creo Elements/Pro. Se iniciará una línea de investigación paralela a la existente para ejes ferroviarios pero en este caso para ruedas ferroviarias.

Tras la exposición de la motivación y los objetivos del proyecto, expondremos el marco teórico en el cual está basado el proyecto con los temas de fenómeno de fatiga y vibraciones mecánicas. Explicaremos que es el análisis modal en que se basa y las aplicaciones que tiene, tras lo cual definiremos brevemente los elementos principales de material rodante de los trenes. Seguiremos con un estudio detallado de los distintos tipos de fallo que ocurren en las ruedas ferroviarias y los métodos de inspección utilizados para su detección. Explicaremos brevemente el funcionamiento de Creo Elements/Pro y detallaremos la metodología utilizada paso a paso para la realización de los análisis modales de la rueda, exponiendo los resultados de la forma más clara posible y sacando las conclusiones apropiadas de ellos. Por último se describirán los posibles trabajos futuros.

Hay que decir que este proyecto se incluirá en la investigación que se está llevando a cabo por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, cuyo objeto es avanzar en el análisis de la defectología ferroviaria mediante software de elementos finitos.

PALABRAS CLAVE

Rueda ferroviaria, análisis modal, vibraciones mecánicas, fatiga, Creo Elements/Pro, frecuencias propias.

ABSTRACT

This project, titled “Modal Variations Analysis of a Railway Wheel with Cracks” has the main purpose to model and analyse a railway wheel with and without cracks to see the differences of the vibration modes through the software Creo Elements/Pro. We will start a research line parallel to the similar research of railway axles.

After exposing the reasons and objectives of this project, its theoretical basis will be explained through the chapters “Phenomenon of Fatigue” and “Mechanical Vibrations”. The fundamentals of modal analysis and its applications will be explored and then the main components of the railway rolling stock will be briefly defined. A meticulous study of the types of defects in a railway wheel and the more frequently used inspection methods will then follow. Furthermore, an introduction to Creo Elements/Pro and the followed methodology to model and analyse a railway wheel will be included. Finally, results and conclusions will be exposed and possible future projects to continue the research line will be described.

This project will be included in the research that is being undertaken by the Charles III University of Madrid Mechanical Department to improve the defectology railway analysis through FEA software.

KEYWORDS

Rail wheel, modal analysis, mechanical vibrations, fatigue, Creo Elements/Pro, own frequencies.

Análisis de las variaciones modales de una rueda ferroviaria con grietas

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL PROYECTO	1
1.1. MOTIVACIÓN	3
1.2. OBJETIVOS	4
1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	6
CAPÍTULO 2. FENÓMENO DE FATIGA	9
2.1. INTRODUCCIÓN	11
2.2. HISTORIA DEL FENÓMENO DE FATIGA	11
2.3 FUNDAMENTOS DEL FENÓMENO DE FATIGA	13
2.3.1 FASES DE PROPAGACIÓN DE GRIETA	14
2.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ROTURA POR FATIGA	15
2.3.3. DIAGRAMAS S-N	15
CAPÍTULO 3. VIBRACIONES MÉCANICAS	20
3.1. INTRODUCCIÓN	22
3.2. CONCEPTOS BÁSICOS	23
3.3 RESONANCIA MECÁNICA	25
3.4. PCRT, PROCESS COMPENSATED RESONANCE TESTING	26
3.4.1. ANÁLISIS DE LA FATIGA MEDIANTE SISTEMAS PCRT	28
3.5. ANÁLISIS MODAL	30
3.5.1. HISTORIA DEL ANÁLISIS MODAL	30
3.5.2. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS MODAL	31
3.5.3. DEFINICIÓN DEL ANÁLISIS MODAL	33
3.5.4. APLICACIONES PRÁCTICAS DEL ANÁLISIS MODAL	33
3.5.5. EJEMPLO DE ANÁLISIS MODAL	32
CAPÍTULO 4. MATERIAL RODANTE	37
4.1. INTRODUCCIÓN	39

4.2. BOGIE	39
4.2.1. CHASIS	40
4.2.2. EJES MONTADOS	40
4.2.3. CAJA DE GRASA	43
4.2.4. RUEDA FERROVIARIA	45
4.2.4.1 TIPOS DE RUEDA	47
4.3. FABRICACIÓN DE RUEDAS	48
4.3.1. FORJA EN BLANCO	49
4.3.2. CONFORMADO	50
4.3.2.1 DISPOSITIVOS DE MEDIDA LÁSER OD	52
4.3.2.2. CONTROL ELECTRÓNICO DE LA MÁQUINA DE CONFORMADO	52
4.3.3. DEFORMACIÓN DEL VELO	53
4.3.4. CONTROL DIMENSIONAL CON LA MÁQUINA LÁSER 3D	53
4.3.5. TRATAMIENTO TÉRMICO	54
4.3.6. SOLICITACIONES A LAS QUE ESTÁN SOMETIDAS LAS RUEDAS	55
CAPÍTULO 5. DEFECTOLOGÍA EN RUEDAS FERROVIARIAS	58
5.1. INTRODUCCIÓN	60
5.2. DEFECTOS EN LA BANDA DE RODADURA	60
5.2.1. DESGASTE	60
5.2.2. DEFECTOS POR FATIGA DE CONTACTO (RCF)	61
5.2.3. FATIGA SUPERFICIAL	64
5.2.4. FATIGA SUBSUPERFICIAL	66
5.2.5. GRIETAS PROFUNDAS	66
5.2.6. GRIETAS TÉRMICAS	69
5.2.7. SOBRECARGA TÉRMICA	71
5.2.8. DEFORMACIÓN LATERAL DE LA BANDA DE RODADURA	71
5.2.9. COLAPSO LOCAL DE LA BANDA DE RODADURA	71

5.2.10. MARCAS EN LA BANDA DE RODADURA	72
5.2.11. RUEDAS ESCAMADAS	72
5.3. DEFECTOS EN LA PESTAÑA	73
5.3.1. DEFORMACIONES DE LA PUNTA DE LA PESTAÑA	73
5.3.2. PESTAÑAS EMPINADAS	74
5.3.3. PESTAÑAS ELEVADAS	74
5.3.4. PESTAÑA FINA	74
5.3.5. PESTAÑAS PEQUEÑAS	75
5.3.6. DESPRENDIMIENTOS EN LA PESTAÑA	76
5.3.7. GRIETAS EN LA PESTAÑA	76
5.4. DEFECTOS EN EL VELO	77
5.5. DEFECTOS EN EL CUBO	78
5.6. OVALIDAD DE LA RUEDA	78
CAPÍTULO 6. MÉTODOS DE INSPECCIÓN	81
6.1. INTRODUCCIÓN	83
6.1.1. TIPOS DE MANTENIMIENTO	83
6.2. MÉTODO DE INSPECCIÓN VISUAL	84
6.3. MÉTODO DE ANÁLISIS ACÚSTICO	85
6.4. MÉTODO DE ANÁLISIS DEL RUIDO DE BARKHAUSEN	85
6.5. MÉTODO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	85
6.6. MÉTODO DE CORRIENTES DE EDDY (INDUCIDAS)	86
6.7. MÉTODO DE LÍQUIDOS PENETRANTES	87
6.8. MÉTODO DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL	89
6.9. MÉTODO DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES	91
6.10. MÉTODO DE MEDIDA DEL IMPACTO SOBRE EL CARRIL	92
6.10.1 SISTEMAS BASADOS EN GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS	92
6.10.2. SISTEMAS BASADOS EN ACELERÓMETROS	92

6.11. MÉTODO ÓPTICO	94
6.12. MÉTODO DE ULTRASONIDOS	95
6.12.1. TIPOS DE TRANSDUCTORES	95
6.12.2. MODOS DE PROPAGACIÓN	96
6.12.3. MÉTODO PHASED ARRAY O DE ARREGLO DE FASE	96
6.12.4. TIPOS DE SISTEMAS	97
6.12.4.1. SISTEMAS EMATs	97
6.12.4.2. SISTEMAS QUE MIDEN EL CAMPO RESIDUAL	98
6.12.4.3. SISTEMAS ULTRASÓNICOS MANUALES	98
6.12.4.4. SISTEMAS PARA RUEDAS NUEVAS	99
6.12.4.5. SISTEMAS PARA LA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN LA BANDA	100
6.12.4.6. SISTEMAS PARA LA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN EL VOLUMEN	101
6.12.4.7. SISTEMAS BASADOS EN EL EFECTO DOPPLER	103
6.13. FRECUENCIA DE INSPECCIÓN	104
CAPÍTULO 7. PRESENTACIÓN DE CREO ELEMENTS/PRO	107
7.1. INTRODUCCIÓN	109
7.2. HERRAMIENTAS DE DIBUJO	109
7.3. HERRAMIENTAS DE MODELADO	111
7.4. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN	113
7.5. HERRAMIENTAS DE VISUALIZACIÓN	114
7.6. TIPOS DE ARCHIVO SOPORTADO	114
CAPÍTULO 8. METODOLOGÍA	116
8.1. INTRODUCCIÓN	118
8.2. DEFINICIÓN DE LA RUEDA FERROVIARIA SOMETIDA A ESTUDIO	118
8.2.1. GEOMETRÍA DE LA RUEDA	118
8.2.2. MATERIAL DE LA RUEDA	119
8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO	119

8.2.4. GEOMETRÍA Y POSICIÓN DE LAS GRIETAS	119
8.3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO	122
8.3.1. MODELADO DE LA RUEDA	122
8.3.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE CREO PARAMETRICS/PRO	122
8.3.3. ANÁLISIS MODAL DE LA RUEDA SIN GRIETA	123
8.3.4. ANÁLISIS MODAL DE LA RUEDA CON GRIETAS	123
8.3.5. CÁLCULO DEL ÁREA DE LAS GRIETAS	123
8.4. SIMPLIFICACIONES CONSIDERADAS	125
CAPÍTULO 9. DESARROLLO DEL PROYECTO	127
9.1. CREACIÓN DEL MODELO DE LA RUEDA	129
9.1.1 CREACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA RUEDA	129
9.1.2 DEFINICIÓN DEL MATERIAL DE LA RUEDA	131
9.2. CONDICIONES DE ANÁLISIS	132
9.2.1. TIPO DE MALLADO	132
9.2.2. PARÁMETROS DE ANÁLISIS	134
9.2.3. OPTIMIZACIÓN DE LOS ANÁLISIS	135
CAPÍTULO 10. RESULTADOS	137
10.1. INTRODUCCIÓN	139
10.2. ÁREA DE LA GRIETA VS PORCENTAJE DE AVANCE	141
10.3. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LA GRIETA RADIAL	142
10.3.1. DIFERENCIAS UNITARIAS EN LA GRIETA RADIAL	145
10.3.2. DIFERENCIAS PORCENTUALES EN LA GRIETA RADIAL	148
10.3.3. Relación Frecuencia – Áreas para la Grieta Circunferencial	151
10.4. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LA GRIETA CIRCUNFERENCIAL	154
10.4.1. Resultados para Profundidad de grieta 25%	155
10.4.1.1. DIFERENCIAS UNITARIAS EN LA GRIETA CIRCUNFERENCIAL (25%)	161
10.4.2. Resultados para Profundidad de grieta 50%	169

10.4.2.1. DIFERENCIAS UNITARIAS EN LA GRIETA CIRCUNFERENCIAL (50%)	175
10.4.3. Resultados para Profundidad de grieta 100%	183
10.4.3.1. DIFERENCIAS UNITARIAS EN LA GRIETA CIRCUNFERENCIAL (100%)	189
10.4.4. Relación Frecuencia – Áreas para la Grieta Circunferencial	197
10.5. LIMITACIONES	202
CAPÍTULO 11. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	204
11.1. CONCLUSIONES	206
11.2. TRABAJOS FUTUROS	208
CAPÍTULO 12. PRESUPUESTO	210
12.1. INTRODUCCIÓN	212
12.2. PRESUPUESTO GENERAL	212
CAPÍTULO 13. BIBLIOGRAFÍA	218
13.1. BIBLIOGRAFÍA	220
CAPÍTULO 14. ANEXO. PLANO DE LA RUEDA	223
14.4. PLANO DE LA RUEDA	225

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Tren de Alta Velocidad	3
Figura 1.2. Accidente de Tren en Toronto	4
Figura 2.1. Curvas de Wólher (S-N)	12
Figura 2.2. Etapas de Propagación de la grieta	14
Figura 2.2. Zonas en la Fractura por Fatiga	15
Figura 2.4. Diagramas S-N	16
Figura 3.1. Vibración Armónica	22
Figura 3.3. Vibración Periódica	22
Figura 3.2. Oscilación de un Péndulo	24
Figura 3.4. Vibración Aleatoria	25
Figura 3.5. Representación de Factor de Amplificación Dinámico	25
Figura 3.6. Puente de Tacoma Narrows	26
Figura 3.7. Ensayo PCRT sobre un eje	27
Figura 3.8. Sistema PCRT	28
Figura 3.9. Representación de la Variación de las Frecuencias Propias-Nº Ciclos	29
Figura 3.10. Análisis Modal de un Eje Ferroviario mediante PCRT	29
Figura 3.11. Sistema Vibratorio de un Grado de Libertad	34
Figura 3.12. Descomposición de una Onda	34
Figura 4.1. Chasis de Bogie	40
Figura 4.2. Eje montado con rodamientos externos (izq) e internos (dcha)	41
Figura 4.3. Eje montado con disco de freno en eje (izq) y rueda (dcha)	41
Figura 4.4. Eje montado con posición simétrica (izq) y antisimétrica (dcha)	41
Figura 4.5. Contacto rueda-carril único punto(a), dos puntos (b) toda la superficie (c)	42
Figura 4.6. Caja de Grasa	43

Figura 4.7. Rodamiento de Rodillos Cilíndricos	44
Figura 4.8. Rodamientos de Rodillos Cónicos	45
Figura 4.9. Rodamientos Triples de Alta Velocidad Japón (a) y Francia (b)	45
Figura 4.10. Partes de la Rueda I	46
Figura 4.11. Partes de la Rueda II	47
Figura 4.12. Rueda Monobloque	47
Figura 4.13. Rueda de Llanta	48
Figura 4.14. Rueda Elástica	48
Figura 4.15. Proceso de Conformado de la Rueda en Blanco	49
Figura 4.16. Preforma Final en la prensa de 90 MN	50
Figura 4.17. Rodillos de la Maquina de Conformado	51
Figura 4.18. Proceso de Conformado	51
Figura 4.19. Matriz de Deformación del Velo	53
Figura 4.20. Maquina Láser 3D	53
Figura 4.21. Ficha UIC 812-3	55
Figura 5.1. Hollow Wear	60
Figura 5.2. RCF, Localizaciones relativas a zonas de la rueda	61
Figura 5.3. Cavidad formada por el desprendimiento de un RCF Cluster	63
Figura 5.4. Representación esquemática de la sección de un plano de rueda	64
Figura 5.5. Excoriación de una rueda (Spalling)	65
Figura 5.6. Shelling	66
Figura 5.7. Típica grieta Shattering	67
Figura 5.8. Zona de localización de grietas circunferenciales en la llanta (mm)	68
Figura 5.9. Crecimiento de grieta por Shattering	68
Figura 5.10. Grieta interna en la llanta de una rueda	69
Figura 5.11. Grieta Térmica	70
Figura 5.12. Grieta Térmica Lateral	70

Figura 5.13. Posición Típica de Inicio de Grieta Térmica	71
Figura 5.14. Marcas en la banda por cuerpos extraños	72
Figura 5.15. Rueda Escamada	73
Figura 5.16. Deformación en la Punta de la Pestaña	73
Figura 5.17. Pestaña Empinada	74
Figura 5.18. Pestaña Elevada	74
Figura 5.19. Pestaña Fina	75
Figura 5.20. Pestaña Pequeña	75
Figura 5.21. Parte Afilada del Carril	76
Figura 5.22. Fisura en la Pestaña	76
Figura 5.23. Grieta en el Velo	77
Figura 5.24. Deformación de Primer, Segundo y Tercer Orden respectivamente	78
Figura 5.25. Pérdida de circularidad Aleatoria	79
Figura 5.26. Posiciones Nominales del Punto de Contacto	79
Figura 6.1. Inspección con Partículas Magnéticas	86
Figura 6.2. Posición de los Sensores de Corrientes Inducidas	86
Figura 6.3. Inspección con fluorescente visible	88
Figura 6.4. Inspección con penetrante fluorescente	88
Figura 6.5. Inspección Radiográfica	90
Figura 6.6. Técnica de rayos X con visualización electrónica	90
Figura 6.7. Posición de los palpadores EMAT	97
Figura 6.8. Barrido electrónico	99
Figura 6.9. Posicionamiento de los Palpadores	102
Figura 7.1. Logo Creo Elements/Pro	109
Figura 7.2. Creo Layout	111
Figura 7.3. Creo Parametric	112
Figura 7.4. Creo Direct	112

Figura 7.5. Creo Simulate	113
Figura 8.1. Vista del Corte de perfil y Alzado de la rueda.	118
Figura 8.2. Porcentajes máximos de los diferentes componentes del acero ER7	119
Figura 8.2.1. Grieta Radial	120
Figura 8.3. Grieta Circunferencial	121
Figura 8.4. Posiciones de la Grieta Circunferencial	121
Figura 8.5. Grieta Radial II	124
Figura 8.6. Área Grieta Circunferencial	124
Figura 9.1. Crear Esbozo	129
Figura 9.2. Perfil de la Rueda	130
Figura 9.3. Rueda 3D.	130
Figura 9.4. Rueda Completa	131
Figura 9.4.1. Características del Material de la rueda ER7.	132
Figura 9.4.2. Mallado por defecto de la rueda.	133
Figura 9.4.3. Tipos de análisis en Creo/Elements Pro	134
Figura 9.4.4. Pestaña de parámetros	134
Figura 10.1.1. Modos de vibración de la rueda (7-18)	139
Figura 10.1.2. Modos de vibración de la rueda (19-30)	139
Figura 10.1.3. Modos de vibración de la rueda (31-40)	140
Figura 10.2.1. Área Grieta radial vs Porcentaje de grieta	141
Figura 10.2.2. Área Grieta radial vs Porcentaje de grieta	142
Figura 10.3. Frecuencias vs Modos en la grieta radial	145
Figura 10.3.1. Frecuencias-Área para Grieta Radial, modos 7-18.	151
Figura 10.3.2. Frecuencias-Área para Grieta Radial, modos 19-29.	152
Figura 10.3.3. Frecuencias-Área para Grieta Radial, modos 30-40.	152
Figura 10.3.4. 'R-cuadrado' para cada modo en Grieta Radial.	154
Figura 10.4. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, Posición 1.	159

Figura 10.5. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 2'.	159
Figura 10.6. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 3'.	160
Figura 10.7. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 4'.	160
Figura 10.8. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 1'.	173
Figura 10.9. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 2'.	173
Figura 10.10. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 3'.	174
Figura 10.11. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 4'.	174
Figura 10.12. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 1'.	187
Figura 10.13. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 2'.	187
Figura 10.14. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 3'.	188
Figura 10.15. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 4'.	188
Figura 10.16. Frecuencias-Área para grieta circunferencial, modos 7-18.	197
Figura 10.17. Frecuencias-Área para grieta circunferencial, modos 19-29.	198
Figura 10.18. Frecuencias-Área para grieta circunferencial, modos 30-40.	198
Figura 10.19. 'R-cuadrado' para cada modo en Posición 1 y Profundidad 100%	200
Figura 10.20. 'R-cuadrado' para cada modo en Posición 4 y Profundidad 100%	202
Figura 14.1. Plano de la rueda (1)	225
Figura 14.1. Plano de la rueda (2)	226

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 8.1. Longitud de la Grieta_____	120
Tabla 8.2. Longitud de las Grietas Circunferenciales_____	122
Tabla 8.3. Área de la Grieta Circunferencial_____	124
Tabla 8.4. Área Grieta Circunferencial_____	125
Tabla 10.1. Área grieta radial según % del radio de la rueda afectado._____	141
Tabla 10.2. Área grieta circunferencial según % del radio de la rueda afectado_____	142
Tabla 10.3.1. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Radial. (1%-40%)_____	143
Tabla 10.3.2. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Radial. (45%-100%)_____	144
Tabla 10.4.1. Diferencias unitarias grieta radial. (1%-40%)_____	146
Tabla 10.4.2. Diferencias unitarias grieta radial. (45%-100%)_____	147
Tabla 10.5.1. Media de las diferencias unitarias según el avance de grieta radial_____	148
Tabla 10.5.2. Media de las diferencias unitarias para cada modo._____	148
Tabla 10.6.1. Diferencias porcentuales grieta radial. (1%-40%)_____	149
Tabla 10.6.2. Diferencias porcentuales grieta radial. (45%- 100%)_____	150
Tabla 10.6.3. 'Funciones' y 'R-cuadrado' de cada modo para 'Grieta Radial'_____	153
Tabla 10.7. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 1'_____	155
Tabla 10.8. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 2'_____	156
Tabla 10.9. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 3'_____	157
Tabla 10.10. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 4'_____	158
Tabla 10.11. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 1'_____	161
Tabla 10.12. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 2'_____	162
Tabla 10.13. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 3'_____	163
Tabla 10.14. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 4'_____	164
Tabla 10.15 Medias de diferencias unitarias según % y posición, Profundidad 25%_____	165
Tabla 10.16. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Pos 1 y Prof 25%'_____	166
Tabla 10.17. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Pos 2 y Prof 25%'_____	166

Tabla 10.18. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Pos 3 y Prof 25%'	167
Tabla 10.19. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Pos 4 y Prof 25%'	167
Tabla 10.20. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Profundidad 25%'	168
Tabla 10.21. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 1'	169
Tabla 10.22. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 2'	170
Tabla 10.23. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 3'	171
Tabla 10.24. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 4'	172
Tabla 10.25. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 1'	175
Tabla 10.26. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 2'	176
Tabla 10.27. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 3'	177
Tabla 10.28. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 4'	178
Tabla 10.29 Medias de diferencias unitarias según % y posición, Profundidad 50%	179
Tabla 10.30. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Pos 1 y Prof50%'	180
Tabla 10.31 Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Pos 2 y Prof50%'	180
Tabla 10.32. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Pos 3 y Prof 50%'	181
Tabla 10.33. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Pos 4 y Prof 50%'	181
Tabla 10.34. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Profundidad 50%'	182
Tabla 10.35. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 1'	183
Tabla 10.36. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 2'	184
Tabla 10.37. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 3'	185
Tabla 10.38. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 4'	186
Tabla 10.39. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 1'	189
Tabla 10.40. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 2'	190
Tabla 10.41. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 3'	191
Tabla 10.42. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 4'	192
Tabla 10.43 Medias de diferencias unitarias según % y posición, Profundidad 100%	193
Tabla 10.44. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Pos 1 y Prof 100%'	194

Tabla 10.45. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Pos 2 y Prof 100%' _____	194
Tabla 10.46. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Pos 3 y Prof 100%' _____	195
Tabla 10.47. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Pos 4 y Prof 100%' _____	195
Tabla 10.48. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Profundidad 100%' _____	196
Tabla 10.49. 'Funciones' y 'R-cuadrado' de cada modo para 'Pos 1, Prof 100%' _____	199
Tabla 10.50. 'Funciones' y 'R-cuadrado' de cada modo para 'Pos 4, Prof 100%' _____	201
Tabla 12.1. Presupuesto de Personal _____	213
Tabla 12.2. Presupuesto de Equipos _____	214
Tabla 12.3. Presupuesto de Otros Costes Directos _____	215
Tabla 12.4. Resumen Presupuesto _____	215

CAPÍTULO 1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 MOTIVACIÓN

Hoy en día el tren es uno de los medios de transporte más usados, tanto para el transporte de mercancías como para el transporte de pasajeros. La gran competitividad en el ámbito del transporte debido al desarrollo de nuevas tecnologías y a cambios en los hábitos sociales, hace necesario una constante mejora continua en todos los aspectos del sector ferroviario para poder seguir manteniendo las exigencias demandas por la sociedad.

Este proyecto se centra en la rueda ferroviaria, la cual es uno de los muchos elementos que componen un tren. La rueda tiene por objeto guiar el vehículo, transmitir los esfuerzos motrices y de frenado al carril y permitir circular en curva, siendo el elemento más importante y crítico dentro del ámbito de la seguridad ferroviaria.

Si bien es cierto que no son muy habituales los accidentes con descarrilamiento, cuando éstos ocurren, son una verdadera catástrofe por el número de vidas que se ponen en peligro. En ocasiones también se pone en peligro el medio ambiente por los posibles contaminantes vertidos en los accidentes ferroviarios de trenes de mercancías.



Figura 1.1. Accidente de tren en Toronto.

Por lo tanto supone un gran reto el llegar a establecer procedimientos de mantenimiento preventivos en ruedas ferroviarias, basados en el estudio de los diferentes defectos que aparecen en las ruedas ferroviarias que hagan aumentar la seguridad de los trenes, y por ende la de las personas que viajan en ellos.

Por otro lado los costes de mantenimiento de las ruedas suponen alrededor de 50% de los costes totales de mantenimiento del tren. Los costes asociados a los accidentes ferroviarios son de elevadísimas magnitudes.

Por todo ello un buen procedimiento para la detección de defectos en ruedas ferroviarias de manera preventiva, supondría una optimización de los costes de las compañías ferroviarias mejorando así en competitividad con otros medios de transporte, beneficiando en última instancia a los usuarios.

Dentro de las muchas líneas de investigación existentes para la detección y prevención de defectos, creando procedimientos preventivos de mantenimiento, está la llevada por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, que trabaja con herramientas informáticas de elementos finitos para la mejora de los conocimientos en este ámbito.

Este proyecto se enmarcará dentro de la línea de investigación de la Universidad Carlos III de Madrid que realiza estudios de variaciones de análisis modales de ejes ferroviarios con fallo, comparándolos con los análisis modales de ejes sin fallo.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es hacer análisis modales de una rueda de ferrocarril con grieta y compararlos con los análisis modales de la misma rueda sin grieta para encontrar las diferencias existentes, utilizando el programa Creo Elements/Pro. Siguiendo así con la línea de investigación del GRUPO MAQLAB, del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, cuyo último fin es la detección de fallos en ámbito ferroviario para reducir el número de accidentes.



Figura 1.2. Tren de Alta Velocidad.

Para conseguir nuestro objetivo, deberemos seguir un proceso en el que iremos cumpliendo objetivos más sencillos, y que en conjunto cumplirán el objetivo principal.

Estos objetivos serán:

- Construir un modelo de rueda lo más semejante posible a la rueda real, en cuanto a geometría y propiedades.
- Elaborar mediante Excel, tablas con los distintos tipos de grietas, obteniendo las dimensiones y áreas de las distintas grietas.
- Implementar los diferentes modelos de rueda ferroviaria para cada una de las grietas anteriormente calculadas mediante Creo Elements/Pro.
- Realizar los análisis modales de cada uno de los modelos con grieta implementados, para obtener los 40 primeros modos de vibración de la rueda a través de Creo Elements/Pro.
- Tratar y ordenar la información obtenida a través de los análisis modales y exponerla mediante tablas Excel.
- Comparar los resultados obtenidos en los análisis de la rueda sin grietas con los de la rueda con grietas.
- Llegar a unas conclusiones finales, exponiendo los resultados y sus características más importantes hallados durante el presente proyecto.
- Exponer posibles trabajos futuros que vayamos viendo durante el desarrollo del proyecto y que por alguna circunstancia no se han llevado a cabo en éste.

Para conseguir nuestros objetivos vamos a realizar principalmente las siguientes tareas:

- Primero modelaremos la rueda ferroviaria en Creo Elements/Pro basándonos en los planos entregados.
- Tras la lectura de la documentación apropiada sobre defectología en ruedas ferroviarias y dentro de todos los posibles casos a estudio decidimos hacer dos tipos de grietas una circunferencial y otra radial con el objeto de cubrir los defectos en velo y llanta.
- Mediante Excel calcularemos las aéreas de las grietas que vamos a realizar, para luego poder realizar tablas de resultados y gráficos de interés.
- Crearemos cada uno de los modelos de rueda ferroviaria con grieta que tenemos, dando lugar a 140 modelos de rueda con grieta diferentes.
- Haremos los correspondientes análisis modales de cada una de las grietas para la rueda ferroviaria en Creo Elements/Pro.
- Procesaremos los datos obtenidos en los análisis con Excel, creando tablas de resultados y tablas comparativas de la rueda sin grieta y la rueda con grietas, lo cual nos permitirá elaborar las conclusiones pertinentes.

1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente proyecto ha sido estructurado en 13 capítulos que vamos a resumir brevemente a continuación.

- *Capítulo 1. Motivación y Objetivos.* En este primer capítulo expondremos los motivos por los que hemos realizado el proyecto, y cuáles son los objetivos a cumplir durante la realización del mismo.
- *Capítulo 2. Fenómeno de Fatiga.* Haremos una introducción al fenómeno de fatiga, repasando la evolución histórica de su estudio, viendo las causas y consecuencias de la aparición de este fenómeno.
- *Capítulo 3. Vibraciones Mecánicas.* Explicación de los conceptos básicos de las vibraciones mecánicas. Introduciremos una explicación del análisis modal y del método PCRT.
- *Capítulo 4. Material Rodante.* Definición y breve explicación de las partes principales del órgano de rodadura, haciendo mayor hincapié en la rueda.
- *Capítulo 5. Defectología en Ruedas Ferroviarias.* Abordaremos todos los posibles defectos existentes en la ruedas, explicando claramente el motivo de la aparición de los mismos.
- *Capítulo 6. Métodos de Inspección.* Enumeramos y explicamos los distintos métodos para detectar defectos en ruedas ferroviarias. Nombraremos y explicaremos métodos específicos que llevan a cabo algunas compañías ferroviarias para inspeccionar sus ruedas.
- *Capítulo 7. Creo Elements/Pro.* Introducción al Creo Elements/Pro, describiendo las características y funciones que tiene y cómo se pueden usar.
- *Capítulo 8. Planteamiento del Problema y Metodología.* Explicaremos en qué consiste el problema del proyecto y los pasos a seguir para conseguir los objetivos del proyecto.
- *Capítulo 9. Aplicación de la Metodología.* Modelaremos la rueda, y haremos los análisis modales de la misma, siguiendo los pasos expuestos en el tema anterior.
- *Capítulo 10. Resultados.* Exposición de los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente proyecto.
- *Capítulo 11. Conclusiones y Trabajos Futuros.* Elaboraremos conclusiones partiendo de los resultados obtenidos anteriormente y definiremos las posibles líneas de estudio a seguir en el futuro.

- *Capítulo 12. Presupuesto.* Desglose del presupuesto general necesario para llevar a cabo el proyecto.
- *Capítulo 13. Bibliografía.* Nombraremos todos los documentos y autores en los que nos hemos apoyado para la realización del presente proyecto.
- *Capítulo 14. Anexos.* Presentación del plano dado por el fabricante para el modelado de la rueda ferroviaria.

TEMA 2. FENÓMENO DE FATIGA

2.1 INTRODUCCIÓN

Se observa que aquellos sistemas mecánicos que soportan ciclos de cargas variables se deterioran más fácilmente y en menos tiempo que aquellos que solo soportan cargas estáticas. Los ciclos de carga y descarga pueden ser producidos por muchas razones, como variaciones de temperatura, ambientes corrosivos y fenómenos mecánicos varios. Cuando estas cargas cíclicas se mantienen en el tiempo, puede ocurrir la aparición de pequeñas grietas casi siempre superficiales que pueden desarrollarse hacia el interior del material, reduciendo de esta manera la capacidad portante del mismo, incluso llegando a producir la fractura. Este fenómeno es conocido como fatiga y es la causa más común de fallo en componentes mecánicos, suponiendo un 50% de los fallos.

Lo más peligroso de este fenómeno es que la rotura del material se produce de manera repentina, sin deformación previa, y que este fallo se produce en condiciones de carga con tensiones muy por debajo de la tensión de rotura estática, incluso por debajo del límite elástico del material.

Desde que se descubrió este fenómeno en el siglo XIX, han sido muchos los esfuerzos puestos para entender los mecanismos que rigen dicho fenómeno. Aún así el fenómeno no se ha llegado a comprender en su totalidad, debido a los numerosos parámetros que influyen en el proceso, siendo alguno de ellos no demasiado conocido. Hoy en día las técnicas han mejorado y los ingenieros son capaces de predecir y estimar la vida útil de componentes, siendo estas estimaciones muy cercanas a la realidad. Hasta hace unos años se utilizaba la teoría clásica de fatiga, pero ahora se utilizan potentes software de simulación que ayudan, de forma muy apreciable, a estimar la vida útil casi de forma exacta.

2.2. HISTORIA DEL FENÓMENO DE FATIGA

El fenómeno de fatiga adquirió mayor importancia a partir de la Revolución Industrial, siglo XIX, aunque ya era conocido desde la antigüedad.

Wilhelm Albert, ingeniero de minas alemán, en 1823, realizó los primeros trabajos relacionados con la fatiga, ensayando eslabones de cadena de elevadores a cargas y descargas sucesivas. Más tarde en 1839, Jean-Victor Poncelet introdujo el término de “fatiga” para denominar a los fenómenos de fallo de materiales por la acción de cargas y descargas.

En 1842 se produjo el accidente de ferrocarril de Versalles (Francia), descarrilando el tren y produciendo una gran cantidad de víctimas. A raíz de este se puso más hincapié en el estudio de este fenómeno. En 1843, W.J.M. Rankine fue el encargado de analizar los ejes del tren descarrilado en Versalles, reconociendo las características distintivas de la fractura por fatiga.

Agust Wölher, ingeniero de ferrocarriles alemán realizó los primeros estudios sistemáticos entre 1852 y 1870, desarrollando una gran cantidad de ensayos de flexión rotativa sobre ejes de ferrocarril. Su trabajo permitió caracterizar el comportamiento a fatiga en base a las curvas que representan tensiones frente a número de ciclos de carga hasta la rotura (curvas S-N), todavía hoy utilizadas. Estableció también el concepto de límite de fatiga, al concluir de sus estudios que algunos materiales tenían un límite de tensión por debajo del cual no se producía rotura por muchos ciclos a los que fuera éste fuera sometido.

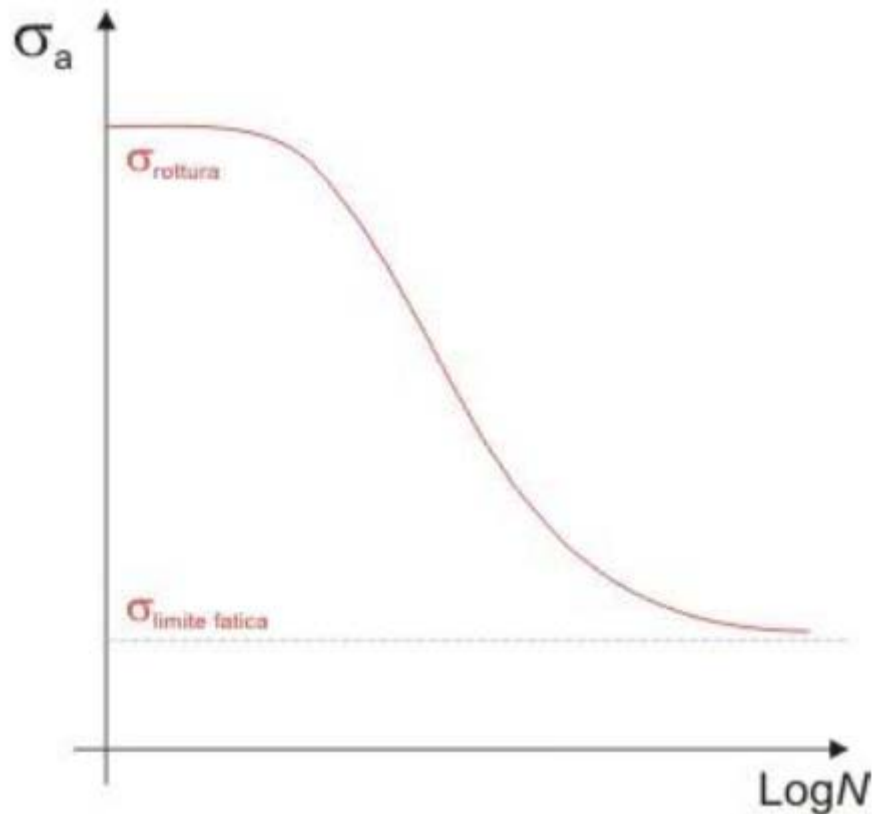


Figura 2.1. Curvas de Wöhler (S-N).

Otros autores como H.Gerber, Goodman o Soderberg también destacaron con sus estudios sobre el fenómeno de fatiga muchos de ellos confirmando parte de los trabajos de Wöhler.

A mediados del siglo XX se obtuvieron gran cantidad de datos experimentales relacionados con factores como geometría y tamaño de las piezas, condiciones ambientales, acabado superficial, etc.

En los 60 apareció la relación empírica Coffin-Manson, que es el método de deformaciones más ampliamente utilizado, en ella sostenían que las deformaciones plásticas son las responsables del daño en el material.

A pesar que desde principios de siglo se conocía que el fenómeno era debido a la creación y crecimiento lento de grieta, la herramienta matemática necesaria para cuantificar los modelos no estaba suficientemente desarrollada.

Bastin en 1910 planteó una ecuación en forma de logaritmo de la tensión frente al logaritmo del número de ciclos, para la zona de vida infinita observada por Wöhler. Es realidad la ecuación utilizada hoy en día proviene de ese planteamiento.

Iwin en 1957 demostró que la amplitud de la singularidad de tensiones delante de una grieta podía ser expresada en términos de una cantidad conocida como factor de intensidad de tensiones, K . Mediante el desarrollo de la mecánica de fractura elástica lineal se intentó caracterizar el crecimiento de las grietas de fatiga también en términos del factor de intensidad de tensiones.

Los primeros en sugerir que el incremento de la longitud de grieta por ciclo, da/dN , podía relacionarse con el rango del factor de intensidad de tensiones, ΔK , bajo cargas de amplitud constante fueron Paris y Erdogan.

La mayor aportación de la mecánica de la fractura elástica lineal es que el factor de intensidad de tensiones, determinado por las tensiones remotas aplicadas y las dimensiones geométricas del componente agrietado, basta para caracterizar la propagación de la grieta.

Más tarde aumento el interés por comprender el proceso por el que el factor de intensidad de tensiones podía verse alterado con el avance de grieta. Así los resultados experimentales de Elber en 1970, descubrieron que la grieta puede permanecer cerrada, incluso cuando está sometida a tensiones cíclicas de tracción, debido a la plastificación producida en el borde de la grieta.

Hoy en día existen una gran cantidad de investigaciones en desarrollo para conocer más en profundidad el fenómeno de fatiga. El avance tecnológico, la disponibilidad de máquinas más complejas, técnicas de inspección más sofisticadas, la aplicación de la mecánica de fractura elástica lineal y elasto-plástica, junto con un mejor conocimiento del gradiente de tensiones y deformaciones en el fondo de la entalla, entre otros, han permitido un gran desarrollo en el cálculo de la vida a fatiga de elementos mecánicos y un aumento de la fiabilidad de los mismos.

Sin embargo a pesar de todas las investigaciones llevadas a cabo durante siglo y medio, todavía hoy no se tiene un pleno conocimiento del fenómeno de fatiga, a pesar de dar como adecuada la teoría del deslizamiento para las fases iniciales de la fatiga de un material. La gran cantidad de datos disponibles para materiales férricos (y algunos otros materiales metálicos) ha permitido desarrollar 'procedimientos de cálculo' razonablemente bien comprobados por multitud de diseños. Dichos procedimientos han permitido diseñar piezas para una duración dada cuando están sometidas a un estado de tensiones variables conocido. Además, la teoría de la fractura por fatiga permite predecir, entre otras cosas, el crecimiento de la grieta con los ciclos de carga. Por esta razón los métodos tradicionales de cálculo junto con la teoría de la fractura por fatiga proporcionan una sólida base para el diseño de sistemas estructurales metálicos.

2.3. FUNDAMENTOS DEL FENÓMENO DE FATIGA

Como explicamos anteriormente un componente sometido a tensiones variables con el tiempo es más propenso a fracturarse aún soportando tensiones mucho menores que las que podría soportar con tensiones estáticas. Vamos a presentar el fenómeno de fatiga en materiales metálicos, los cuales son más propensos a sufrirlo y por ser el material con el que se fabrican las ruedas ferroviarias que son el elemento fundamental de nuestro proyecto.

2.3.1. FASES DE PROPAGACIÓN DE GRIETA

El inicio y la nucleación de grietas por fatiga suele describirse normalmente en superficies libre, aunque en algunos materiales puede ocurrir en el interior. Típicamente la progresión de una grieta tiene lugar en un componente sometido a fatiga tiene tres etapas: iniciación, propagación estable de la grieta y por último una propagación acelerada que termina con la fractura.

Iniciación: Se producen deformaciones plásticas en los granos del material próximos a la superficie donde las variaciones de tensión son más elevadas, lo cual genera el proceso de iniciación de la grieta. Al tiempo que se deforma uno de los granos superficiales se produce un escalón que se oxida, así la sucesión de deformaciones y oxidaciones provocan microgrietas que se van intensificando hasta la formación de la grieta. Estas grietas suelen ocurrir con mayor facilidad en lugares de concentración de tensiones, como bordes, entallas, agujeros, etc. A veces el inicio de la grieta viene originado por propios defectos del material como poros e inclusiones, o por discontinuidades geométricas.

Propagación: La grieta o grietas se seguirán propagando en dirección perpendicular a las cargas aplicadas sobre el material. Esto es porque es la dirección que requiere menor energía para propagarse. Las grietas son muy finas y muy difíciles de detectar incluso aún cuando están cerca de producir la rotura del material.

Rotura: Las grietas siguen creciendo y avanzando por cizalladura, hasta llegar al punto de que la sección útil de la pieza es tan reducida que no es capaz de resistir la carga desde el punto de vista estático, produciéndose así la rotura repentina de la pieza. En esta etapa la velocidad de crecimiento es muy grande por lo que el número de ciclos que se producen en ella apenas cuenta en la vida total de la pieza.

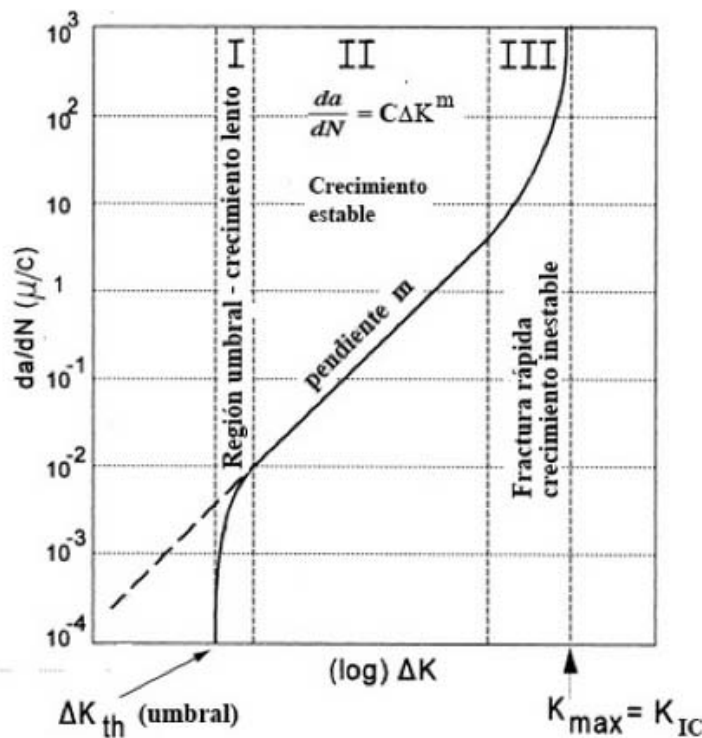


Figura 2.2. Etapa de Propagación de la Grieta.

En las piezas que han sufrido fractura por fatiga podemos diferenciar visualmente de forma fácil las zonas afectadas por cada etapa. La duración de cada una de las etapas anteriormente descritas, pueden variar notablemente dependiendo del tipo de material.

2.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ROTURA POR FATIGA

La apariencia de la superficie de un elemento que ha sufrido fractura por fatiga puede aportar información sobre las condiciones de trabajo y de la rotura del mismo. Observándola podemos distinguir las tres partes correspondientes a las fases de propagación de la grieta de manera más o menos clara. Se distinguen en la superficie las playas (crecimiento de la grieta con los diferentes ciclos de carga) que aparecen juntas al principio y luego se van separando en la zona de cercana a la rotura final.

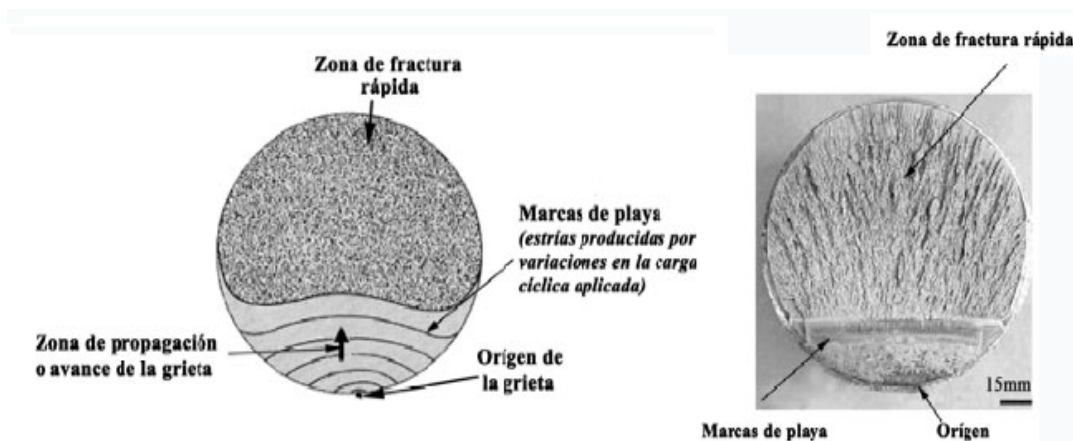


Figura 2.3. Zonas en la fractura por fatiga.

Zona 1: Es la zona de mayor sección y corresponde a la etapa de iniciación de la grieta y crecimiento lento en esa zona se encuentra el punto de concentración de tensiones que origina las grietas. Normalmente tiene un aspecto liso, pudiéndose en ocasiones distinguir la propagación ciclo a ciclo (cada línea o estria).

Zona 2: Representa la zona de propagación de la grieta, donde la velocidad de crecimiento es mayor. A veces representa casi todo el resto de la sección y su aspecto visual puede ser de superficie irregular.

Zona 3: Zona donde se produce la rotura final de la pieza. Cuando la rotura tiene aspecto cristalino es que corresponde a una fractura frágil, mientras que si tiene un aspecto fibroso es que se ha producido una fractura dúctil.

2.3.3. DIAGRAMAS S-N

Los estudios estructurales intentan calcular la respuesta de un diseño concreto, sujeto a un entorno definido de cargas y restricciones, pero no pueden predecir los fallos por fatiga. Si los resultados están por debajo de un cierto nivel admisible se puede concluir que el diseño es seguro, pero solo para ese entorno de solicitaciones.

Los resultados de los estudios estructurales (estáticos, dinámicos, lineales, y no lineales) se utilizan como los datos de referencia para el estudio de la fatiga. El número de ciclos para que el fallo a fatiga se produzca en un determinado punto dependerá del material y de la variación de tensiones a la que se le someta. Esta información, para ciertos materiales férricos, la podemos obtener de los diagramas S-N.

También conocida como curvas de Wölher, los diagramas S-N (Stress-Numero de ciclos), representan la duración de la pieza expresada en número de ciclos hasta rotura (N), con respecto a la máxima tensión aplicada (S). Estos diagramas se basan en ensayos de probetas de sección circular, sometidas a esfuerzos de flexión, mientras se las hacía girar. Realizando estos ensayos múltiples veces modificando solamente el esfuerzo a flexión se obtiene el número de ciclos que duraba la probeta para cada esfuerzo, dando lugar así a los diagramas S-N.

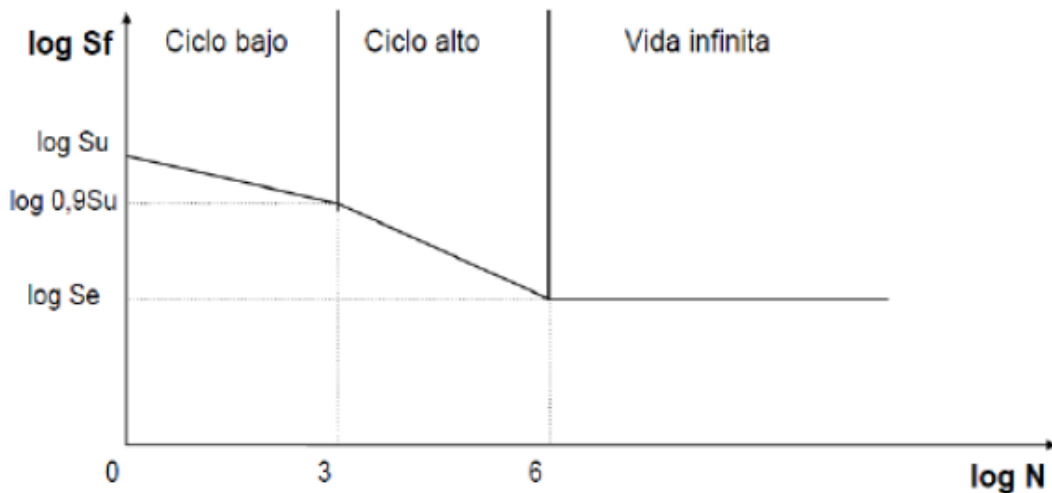


Figura 2.4. Diagrama S-N.

Podemos observar tres zonas claramente diferenciadas aunque solo se dan en algunos materiales férreos.

Hay un valor de tensión por debajo del cual vemos que por muchos ciclos a los que sometamos al material la probeta no rompe. Ese valor de tensión se conoce como límite de fatiga de la vida rotatoria o límite de fatiga sin corregir S_e' .

En el diagrama diferenciamos una primera zona con una tendencia hasta los 10^3 ciclos en la que el valor de tensión de rotura se reduce de manera leve. Esta zona es la zona de fatiga de ciclo bajo, en la que el material se comporta casi de la misma manera que con cargas estáticas.

Luego hay una segunda tendencia entre 10^3 y 10^6 ciclos conocida como zona de fatiga de ciclo alto, donde se produce una reducción bastante importante de la tensión de rotura del material, siendo esta mucho menor que la tensión de rotura para cargas estáticas.

Luego aparece una línea horizontal que generalmente para los materiales no ferrosos y aleaciones no presenta una pequeña pendiente negativa, lo que indica que esos materiales no tienen límite de fatiga, es decir que llegará un número de ciclos para los cuales el material rompa aunque sea un número de ciclos muy alto.

Cuando no se conocen datos experimentales para determinar el límite de fatiga se usa el siguiente criterio.

Para Hierros y Aceros forjados:

$$S_e' = 0,5 S_{ut} \quad S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa}$$

$$S_e' = 700 \text{ Mpa} \quad S_{ut} \geq 1400 \text{ MPa}$$

Para Aceros colados:

$$S_e' = 0,45 S_{ut} \quad S_{ut} \leq 600 \text{ MPa}$$

$$S_e' = 275 \text{ Mpa} \quad S_{ut} \geq 600 \text{ MPa}$$

Hay que decir que todos los datos que se pueden obtener de los diagramas S-N solo sirven para las condiciones en las que se realizó el ensayo, no siendo validos para otras condiciones ambientales, de carga de geometría, etc. Hay que destacar que casi todos los ensayos para la elaboración de los diagramas S-N fueron realizados para flexión con rotación de la probeta de forma que la tensión media es nula.

Por lo tanto una pieza cualquiera tiene un tipo de construcción y una forma de trabajo habitualmente bastante distintas respecto a la probeta de ensayo. En la práctica se recurre a coeficientes de corrección empíricos, que ajustan el comportamiento a fatiga de las probetas a los de cada pieza.

Estos factores modificativos se conocen como factores de Marin y dan lugar a la siguiente ecuación:

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot S_e'$$

Siendo:

K_a = Factor de acabado superficial, sabemos que acabados superficiales de peor calidad reducen el límite de fatiga.

K_b = Factor de tamaño, generalmente a mayor diámetro menor es el límite de fatiga.

K_c = Factor de confiabilidad, permite diseñar un elemento mecánico con una vida determinada con una probabilidad correspondiente.

K_d = Factor de temperatura, pues las propiedades mecánicas del material se pueden ver modificadas por la temperatura a la cual este es sometido.

K_e = Factor de concentración de tensiones, sabemos que la existencia de agujeros, ranuras, chavetas, muescas u otro tipo de discontinuidades alteran la distribución del esfuerzo y por tanto el límite de fatiga.

K_f = Factor de efectos diversos, se usa para corregir otras características que pueden afectar al límite de fatiga como efectos residuales, características direccionales, efectos de tratamiento superficial, etc.

La aplicación de todos esos factores da lugar al límite de fatiga corregido, que se define como el valor de tensión alternante máxima para la cual el componente tiene una vida infinita en condiciones de funcionamiento.

El fenómeno de fatiga tiene además de todo lo explicado anteriormente, mucha más cosas en las que se podría profundizar, y aunque es necesario y vital una comprensión del mismo, el objeto del presente proyecto no es la realización de estudio de fatiga alguno, sino la realización de un análisis modal, por lo que con lo explicado hasta ahora será base suficiente para entender lo que realizaremos más adelante en nuestro proyecto.

TEMA 3. VIBRACIONES MECÁNICAS

3.1 INTRODUCCIÓN

Podemos definir la vibración mecánica como el movimiento de una partícula o cuerpo que oscila en torno a su posición de equilibrio. Las vibraciones que tienen lugar en maquinas o sistemas mecánicos, pueden aumentar los esfuerzos que estas soportan y producen pérdidas de energía, ocasionando en algunos casos la rotura, por lo que casi siempre son indeseables. Se tratan de evitar o reducir al máximo.

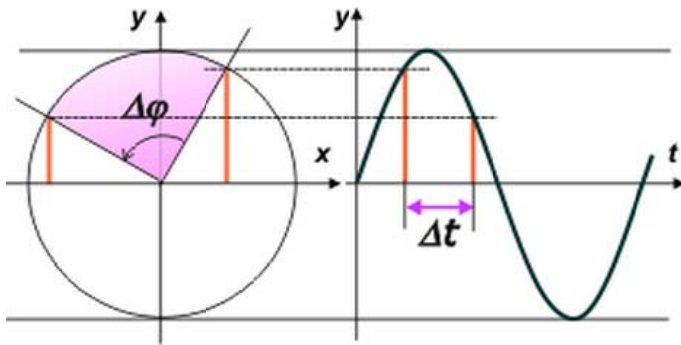


Figura 3.1. Vibración Armónica.

Las vibraciones suelen aparecer cuando el elemento o sistema se desplaza de su posición de equilibrio debido a las fuerzas a las que está sometido. Pueden ser fuerzas gravitacionales, como el caso de un péndulo o cargas elásticas, como el caso de una masa unida a un resorte.

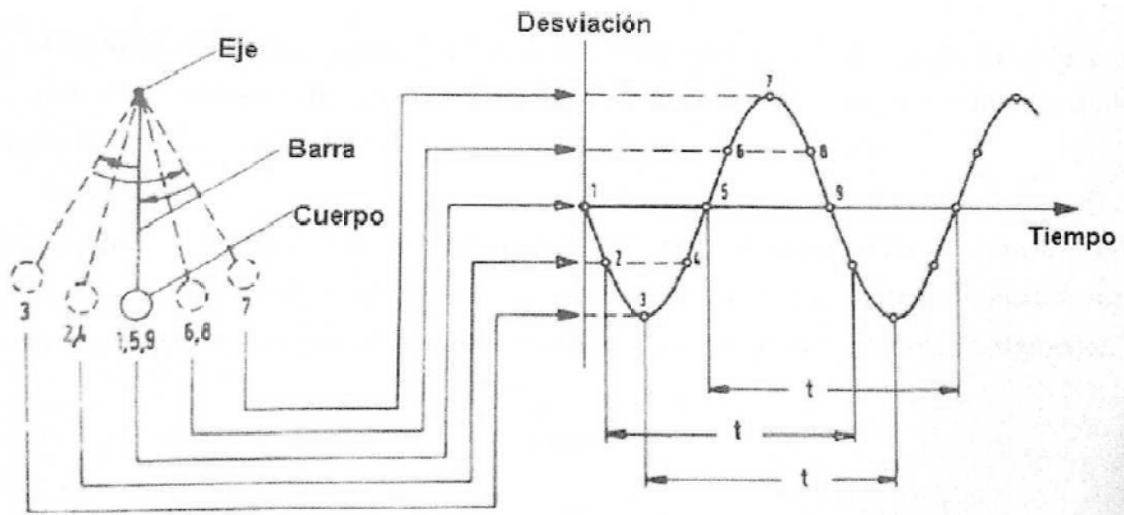


Figura 3.2. Oscilación de un Péndulo.

Generalmente las vibraciones se producen por el propio funcionamiento del sistema o maquina, en dicho movimiento se producen tres fenómenos energéticos:

- Almacenamiento de energía cinética en las masas e inercias.
- Almacenamiento de energía potencial en elementos elásticos.
- Pérdida gradual de energía en los elementos disipativos.

Hoy en día las normas, procedimientos y metodologías como el mantenimiento predictivo en el estudio de vibraciones nos ayudan a asegurar el buen funcionamiento de los sistemas y a conocer el estado de las maquinas tanto en el momento del análisis como en el futuro.

En la actualidad el análisis de vibraciones es muy importante y se cree que se volverá incluso más en el futuro debido la tendencia de construir maquinas de mayor velocidad y más ligeras. Este tipo de análisis es básico para el diseño correcto de los sistemas de máquinas y estructuras.

3.2. CONCEPTOS BÁSICOS

El fenómeno de vibración comprende una serie de conceptos que son necesarios explicar:

- Amplitud de Onda: Es el valor máximo que puede alcanzar una partícula en vibración con respecto la posición de equilibrio.
- Periodo T : Es el intervalo de tiempo que transcurre entre dos estados idénticos y consecutivos de una perturbación en un punto.
- Frecuencia f : Es la inversa al periodo, define el número de veces que se repite una posición en cada segundo. Su unidad es el hercio (Hz).
- Frecuencia Natural o Frecuencia Propia ω : En sistemas de un grado de libertad, es la frecuencia del movimiento armónico que resulta al aplicar un desplazamiento o una velocidad inicial a un punto que se encuentra en equilibrio y se deja vibrar libremente sin ningún tipo de amortiguador. En sistemas con más de un grado de libertad, cada modo natural de vibración tendrá una frecuencia natural asociada, la cual será la del movimiento armónico resultante.
- Frecuencia de Excitación Ω : Se define como la frecuencia asociada a una perturbación que trabaja desde el exterior, actuando sobre el sistema mecánico y que varía armónicamente. Siendo ω_n la frecuencia natural del sistema y Ω la de la excitación, la relación entre ambas frecuencias se representa mediante β , es decir $\beta = \frac{\Omega}{\omega_n}$. En el caso particular donde ambas frecuencias coinciden, es decir $\beta=1$, se considera que el sistema se encuentra en resonancia.
- Movimiento Ondulatorio: Es el movimiento que describe la onda. Una onda es una transmisión de energía o perturbaciones, que se dividen en dos tipos: ondas estacionarias y ondas transitorias. También pueden clasificarse según las dimensiones en las que se desplacen: ondas unidimensionales, ondas bidimensionales y ondas tridimensionales.

- Velocidad de propagación: Es la velocidad a la que se desplaza una onda determinada. El valor depende del medio por el que se produzca la propagación.
- Vibraciones libres: Son aquellas que tienen lugar en ausencia de fuerzas externas.
- Vibraciones forzadas: Las que tienen lugar debido a la presencia de fuerzas externas que varían con el tiempo.
- Coefficiente de amortiguamiento ξ : Es el cociente entre el amortiguamiento del sistema y el amortiguamiento crítico, siendo el amortiguamiento crítico aquél en el que el sistema deja de ser oscilante. $\xi = \frac{C}{2\sqrt{mk}} = \frac{C}{2m\omega_n}$
- F.D.A. Factor Dinámico de Amplificación: Es el número de veces que la amplitud de la oscilación dinámica supera a la estática.

$$\frac{D}{\delta p} = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\frac{\Omega}{\omega_n})^2)^2 + (2\xi \frac{\Omega}{\omega_n})^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}}$$

- Vibración Armónica: Se trata de la forma más simple de oscilación. Es representada por una onda sinusoidal y por lo general, se genera en sistemas lineales debido a la presencia de algún problema potencial. Se estudia a través de un vector rotatorio con velocidad angular constante.
- Vibración periódica: Se define como el movimiento que se repite de igual forma en intervalos de tiempo. Un ejemplo claro de este tipo de vibración se presenta cuando existen problemas de funcionamiento en una transmisión dentada.

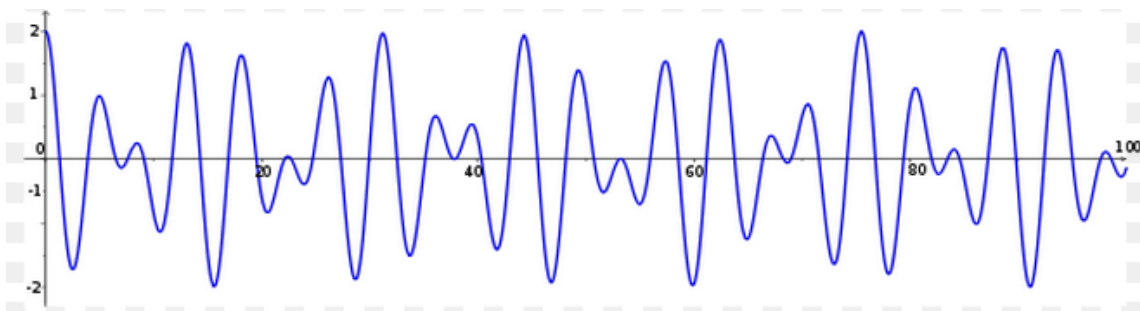


Figura 3.3. Vibración Periódica.

- Vibración Aleatoria: Ocurre de forma errática y tiene contenidos de frecuencias en toda la banda de frecuencias analizada. Esto quiere decir que las vibraciones aleatorias producirán un espectro continuo, es decir, el espectro estará constituido por infinitas vibraciones armónicas, en la cual cada una estará caracterizada por una amplitud, frecuencia y fase respectivamente.

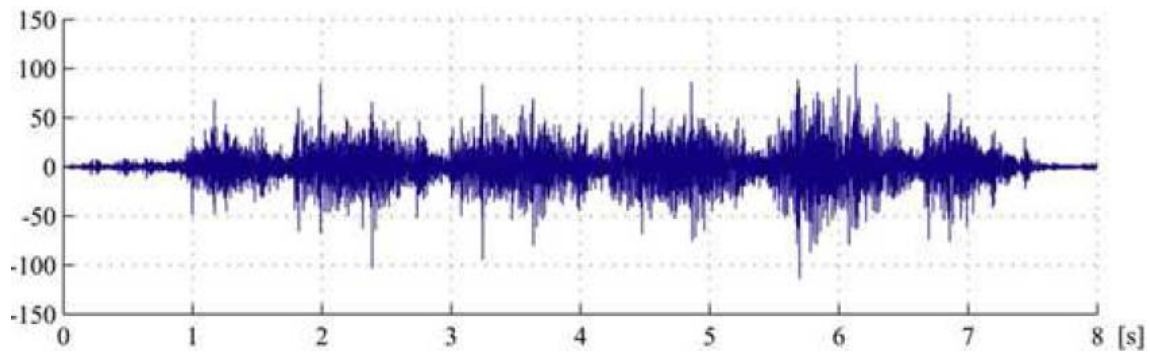


Figura 3.4. Vibración Aleatoria

Según las definiciones vistas anteriormente podemos decir que las vibraciones se podrían clasificar en libres o forzadas, dependiendo de su modo de excitación. También pueden ser armónicas, aleatorias o periódicas.

3.3 RESONANCIA MECÁNICA

Definimos resonancia al fenómeno que se produce cuando un sistema capaz de vibrar es sometido a una carga periódica, cuya frecuencia de vibración coincide con la frecuencia natural del sistema, en el cual la aplicación repetida de una carga relativamente pequeña hace que la amplitud de oscilación se vuelva muy grande incluso llegando al colapso del sistema.

Vamos a ver como varía el factor de amplificación dinámico en función de la relación de frecuencias y del coeficiente de amortiguamiento.

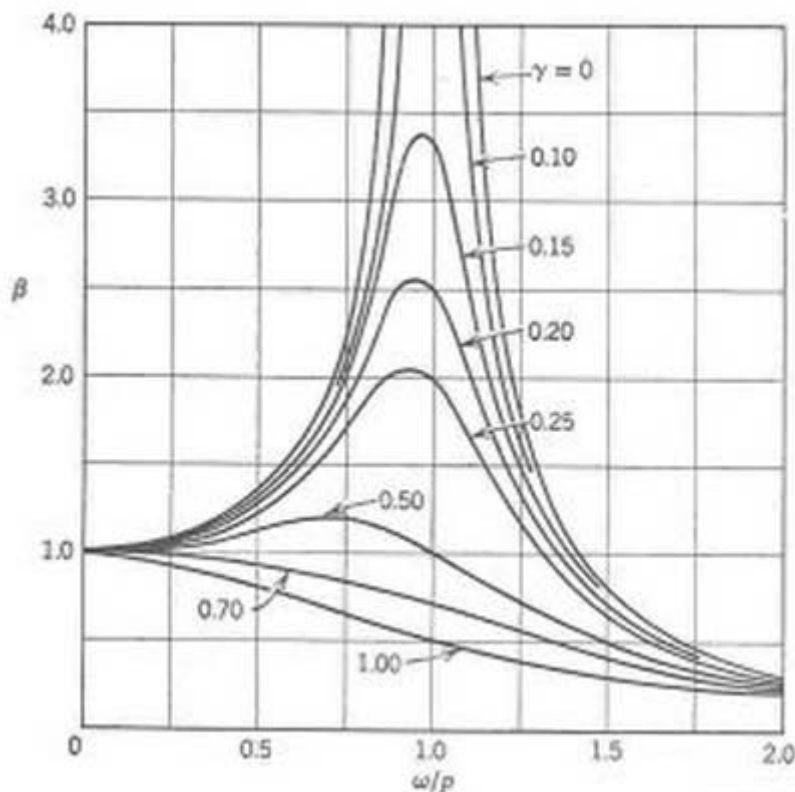


Figura 3.5. Representación de Factor de Amplificación Dinámico.

Podemos decir que a día de hoy los sistemas estáticos sometidos a cargas estáticas están totalmente controlados, no existiendo incertidumbres sobre que puede o no puede pasar dependiendo de las cargas aplicadas. Sin embargo, si nos referimos a sistemas con cargas dinámicas aplicadas, aparecen muchas incertidumbres, pues no se conoce con certeza el comportamiento de cualquiera de estos sistemas. Hay muchas líneas de investigación al respecto con el objeto de entender mejor el comportamiento de sistemas dinámicos, además las investigaciones parte de muchas ramas de todas las ramas de la ingeniería, sobre todo en el campo de nuestro proyecto, las vibraciones mecánicas.

Hay que decir que las vibraciones mecánicas no siempre son indeseables, en ocasiones se producen de forma controlada y con algún propósito específico en procesos industriales. Se denominan buenas vibraciones, algún ejemplo de ellas son: transporte de material en bandas vibratorias, acabado y pulido por vibración o procesos de centrifugación para separar compuestos.

Dentro de los casos donde un sistema se ha visto afectado por el problema vibratorio de resonancia hay que destacar sin duda, el colapso del puente de Tacoma Narrows en 1940. Este colapso ocurrió bajo condiciones de carga menores a las que se había diseñado el puente. Los vientos que originaron la catástrofe no superaron los 65 km/h y el puente había sido diseñado para soportar vientos de hasta 140 km/h. El puente colapso por un problema de vibraciones, que originaron unos esfuerzos sobre el puente, que éste no pudo soportar.

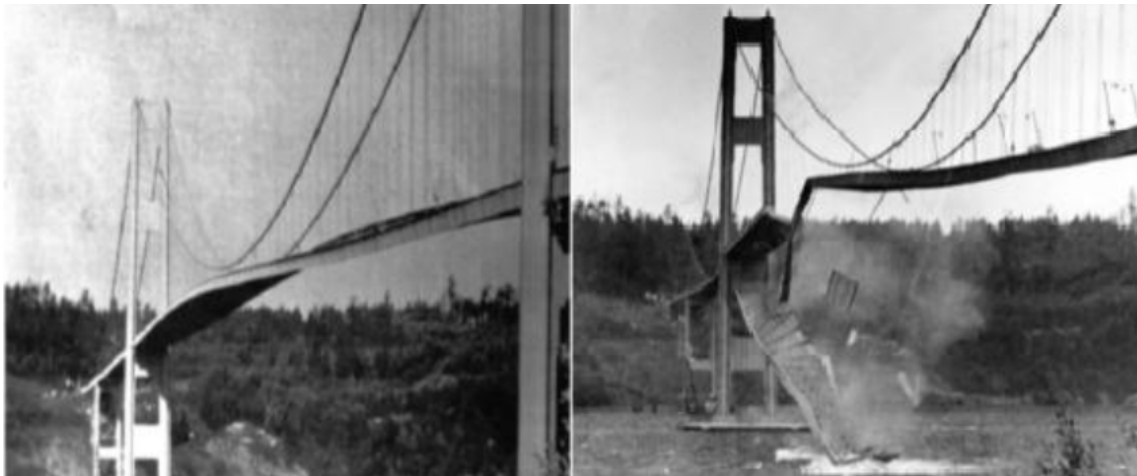


Figura 3.6. Puente de Tacoma Narrows.

Este hecho supuso un punto de inflexión en la forma de afrontar o pensar sobre el tema de las vibraciones en los sistemas, para los ingenieros. Las vibraciones desde entonces fueron estudiadas con mucha seriedad.

3.4. PROCESS COMPENSATED RESONANCE TESTING (PCRT)

Es una técnica o tipo de ensayo no destructivo que está basada en un software analítico y electroscopia de resonancia que es desarrollada y apoyada por empresas influyentes de muchos sectores de la ingeniería y por la Unión Europea.

El PCRT es aplicable a cualquier tipo de pieza metálica y cerámica, y se basa en la utilización de la resonancia mecánica, la utilización del proceso de compensación en un entorno real de fabricación mas allá de las condiciones de laboratorio, la realización de

medidas precisas de frecuencia y la compensación de efectos e temperatura que pudieran afectar a la precisión del estudio de frecuencias.



Figura 3.7. Ensayo PCRT sobre un eje.

Los análisis de frecuencias propias de un componente (electroscopia), han sido mayormente utilizados en el control de calidad en la fabricación de componentes para automóviles. Más tarde fue implementado en otros sectores como el aeronáutico o la inspección y mantenimiento. Fue además ampliamente desarrollada a través del proyecto WIDEM (Wheel set Integrated Design Effective Maintenance).

Las técnicas de ensayo no destructivo de la actualidad como radiografías, ultrasonidos, líquidos penetrantes, etc. Detectan defectos en piezas y resaltan indicios presentes en la estructura de la pieza a lo largo de su vida útil. El mayor problema de estas técnicas es que el tamaño aparente del indicio del defecto no es buen indicador de si el defecto es en realidad relevante de cara al funcionamiento de la pieza en servicio o no. Por lo que mediante estos métodos se pueden considerar piezas defectuosas aquellas que en realidad podrían ser utilizadas sin problema, con los costes que ello acarrea y más aún en piezas críticas que deben ser sustituidas al menor indicio de daño.

Sin embargo mediante la tecnología PCRT a través del estudio de las variaciones de las frecuencias propias de una estructura consigue detectar cambios estructurales relevantes. El objetivo primordial de esta tecnología es diferenciar las piezas con defectos que podrían tener un fallo prematuro en servicio de aquellas que no.

En los sistemas basados en la tecnología PCRT el hardware se ocupa de las mediciones de las frecuencias y el software estudia el patrón de resonancia para determinar la integridad estructural del componente. Se puede detectar la aparición de grietas o defectos por la variación de las frecuencias modales.

En los sistemas PCRT se emplea un transductor que excita el componente mediante un rango de frecuencias, el rango puede variar desde unos pocos hertzios hasta 5 MHz, dependiendo del material. Hay otros dos transductores que reciben la respuesta modal del componente a la excitación producida.

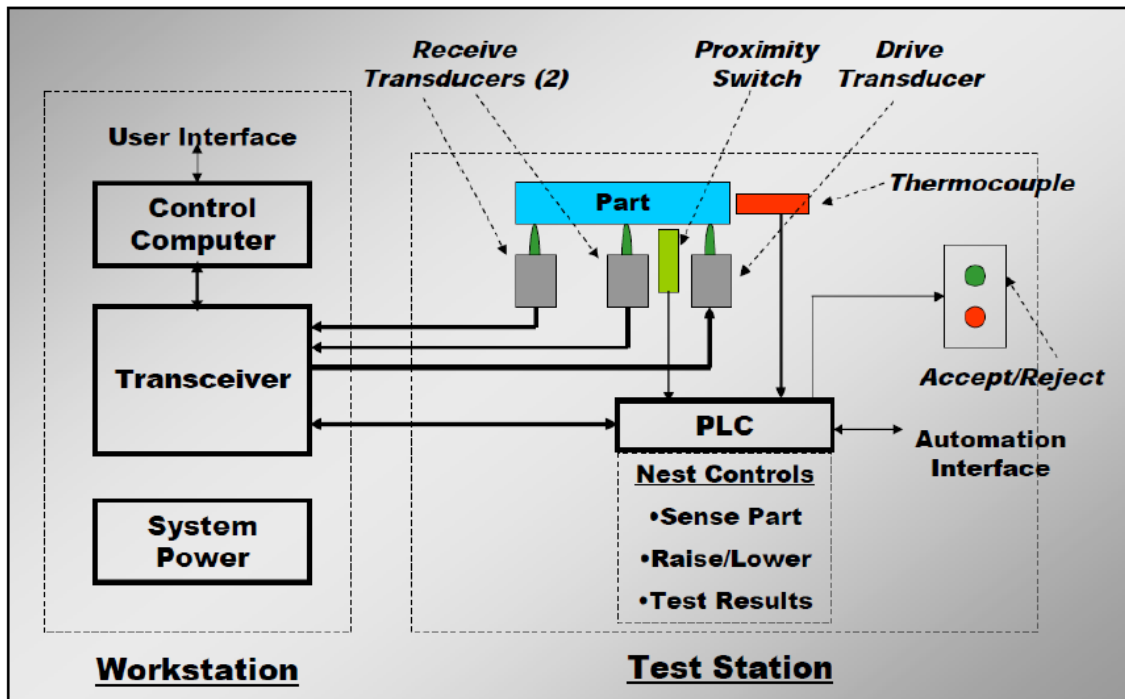


Figura 3.8. Sistema PCRT.

Hay que recordar que la detección de la aparición de la grieta indica que el fallo de la grieta ha comenzado. El material habrá sufrido fatiga hasta el momento de aparición de la grieta y en este momento se está desarrollando. Se supone que la pieza está en servicio con lo que hay un riesgo de que ésta fracture con las graves consecuencias que esto puede ocasionar.

Las técnicas PCRT suponen un gran avance en la inspección de componentes, ya que a diferencia de los demás END, las PCRT son capaces de detectar el comienzo del fenómeno de fatiga antes de que aparezca el inicio de la grieta. Además, como el propio software determina en tiempo real si la pieza se encuentra dañada o no.

3.4.1. ANÁLISIS DE LA FATIGA MEDIANTE SISTEMAS PCRT

Vamos a comentar un par de estudios sobre el análisis de fatiga mediante sistemas PCRT, que fueron llevados a cabo en los últimos años, para así explicar cómo se trabaja con estos sistemas.

El primer estudio fue realizado en 2006 por la empresa **VIBRANT** y fue desarrollado conjuntamente con el Centro de Validación de Alburquerque.

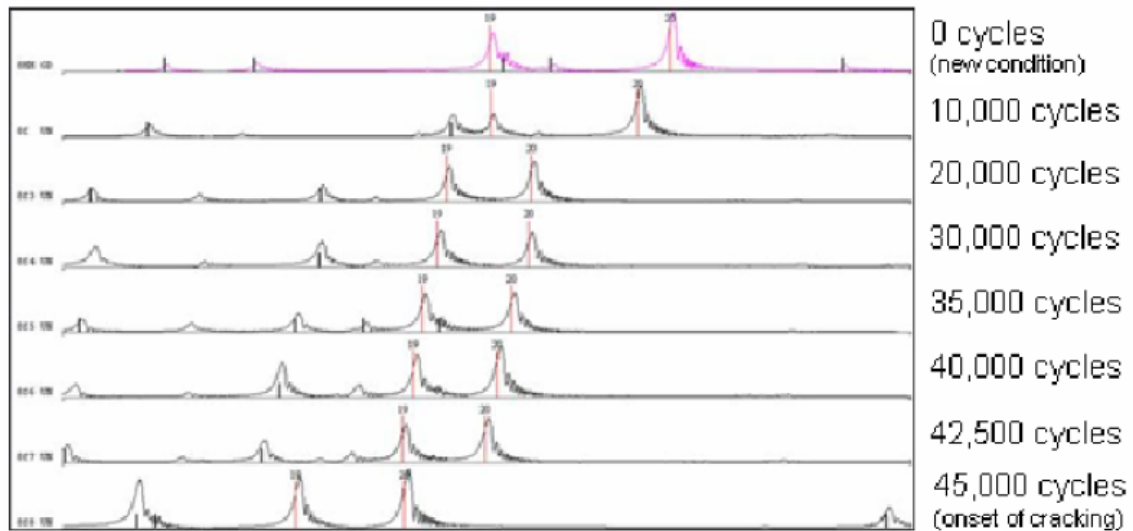


Figura 3.9. Representación de la Variación de las Frecuencias Propias con el N° de Ciclos.

Podemos ver que aunque la detección de la grieta se produce a los 45.000 ciclos, anteriormente se va produciendo una variación progresiva de las frecuencias propias del componente a medida que se acumulan los ciclos.

El segundo estudio fue desarrollado por la empresa italiana, **LUCHINI**, donde se hace el análisis modal de un eje ferroviario, algo muy parecido a lo que es presente proyecto tiene por objeto, que es el análisis modal de una rueda ferroviaria.

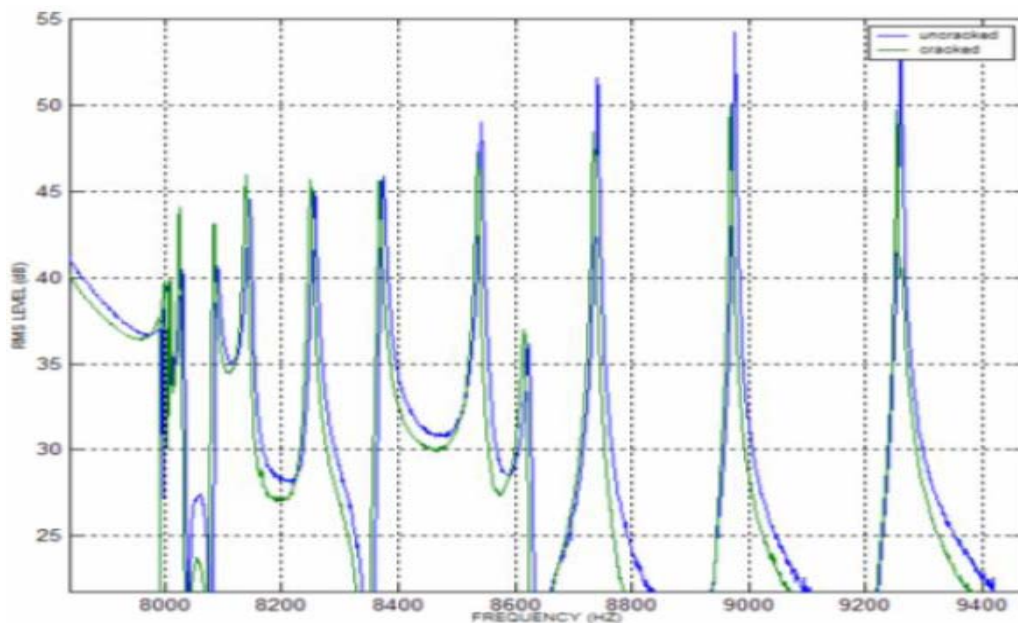


Figura 3.10. Análisis Modal de un Eje Ferroviario mediante PCRT.

La capacidad de los sistemas PCRT para realizar el seguimiento del fenómeno de fatiga fue también testada en componentes aeronáuticos ferrosos. Se sometieron a fatiga diferentes piezas, siendo sus frecuencias propias estudiadas y monitorizadas.

Los estudios han demostrado que el sistema PCRT puede detectar cambios en el espectro de frecuencias que preceden al inicio de grietas y que los cambios de frecuencia son proporcionales al tamaño de grieta mientras esta se propaga.

3.5. ANÁLISIS MODAL

El presente proyecto consiste en el análisis de las variaciones modales de una rueda de ferrocarril ante fallo, por lo que considero fundamental una breve explicación de lo que es el análisis modal y como se puede aplicar en el estudio de defectos en ruedas de ferrocarril.

3.5.1. HISTORIA DEL ANÁLISIS MODAL

Lo fundamental del análisis modal es la interpretación de fenómenos complejos en la estructura dinámica con unos simples componentes, como puede ser, los modos de vibración naturales. Esto viene de una idea atomista, en la cual se buscan los elementos más sencillos y básicos para a partir de ellos obtener las demás sustancias, otro concepto es el de las series de Fourier, la cual de una simple combinación de ondas de seno y coseno, se obtiene una complicada onda, en este sentido se puede dar por hecho el origen del análisis modal, sin embargo hay otros dos hechos representativos para el inicio del análisis modal. El primero se obtiene a partir de las observaciones de Newton, del espectro de la luz solar, la cual confirmó la composición de los colores y sus componentes, en segundo lugar sin ser menos importante se tiene a Fourier, ya que basado en un conocimiento matemático, obtiene que una función periódica arbitraria con un intervalo infinito puede ser siempre representado por una sumatoria de funciones armónicas simples, de aquí el desarrollo del análisis modal.

La teoría del análisis modal se puede definir con una ecuación de onda, la cual puede describir la dinámica de una secuencia de vibraciones, de esta solución se puede obtener las frecuencias naturales, los modos de vibración y la respuesta forzada. Esta parte del análisis modal, se desarrolló en gran parte en el siglo XIX, en esta etapa el análisis modal estuvo ligado a las matemáticas, por el hecho de la solución de las ecuaciones diferenciales parciales, puesto que éstas describen una gran variedad de estructuras dinámicas continuas.

La teoría fue desarrollada tal que un análisis dinámico de la estructura en un sistema arbitrario, puede ser obtenido cuando se conoce la distribución de su masa y dureza en forma matricial. Sin embargo la teoría solo puede ser realizada una vez que las computadoras fueron inventadas. En ese aspecto el análisis modal teórico es mucho más análisis modal numérico.

Es en el siglo XX cuando se inicia el análisis modal experimental. La función vital del análisis modal experimental, es la búsqueda del sistema, como un resultado, lo cual fue desarrollado gracias al avance que se logró en la rama de la ingeniería eléctrica y de sistemas. La afinidad de los circuitos eléctricos y un procedimiento mecánico, acentuó la aplicación de alguna suposición del análisis de circuitos hacia el estudio de sistemas mecánicos. Con lo cual se originaron las técnicas de impedancia mecánica y el análisis del subsistema en la dinámica estructural.

El desarrollo del algoritmo de la transformada de Fourier por J.W.Cooly y J.W.Turkey en 1965, tuvo como objetivo la aplicación rápida y aprovechar una práctica experimental en estructuras dinámicas. Con el FFT, las respuestas de la frecuencia de una estructura pueden ser calculadas mediante una medida de entrada dada y la respuesta resultante. La hipótesis del análisis modal, establece la correlación entre la medida de la FRFs y los datos modales de una muestra probada. Donde se puso énfasis para el desarrollo de esta técnica, fue en derivarla información modal de la medida de FRF.

Los pioneros del análisis experimental fueron C.C.Kennedy y C.D.Pancu en 1947 antes de que la FFT se hubiera hecho, pero este método no se siguió desarrollando hasta que el FFT llegó y resurgió el análisis modal experimental, a partir de aquí cuantiosos métodos han sido propuestos y gran parte se han computerizado, incluso estos métodos son cimentados más en vibraciones libres de una estructura que en su respuesta en frecuencia.

El análisis modal metódico tradicional basado en la proporcionalidad de un modelo de amortiguamiento, fue difundido en uno no proporcional, con lo que se logró abrir el camino para los modos de vibración complejos y se pudo devolver la solución a los problemas dinámicos estructurales inversos como la identificación de la fuerza desde una medida de respuesta y las características no lineales fueron desarrolladas experimentalmente. En la actualidad el campo del análisis modal ha sido de gran ayuda en la rama de la ingeniería y la ciencia.

3.5.2 INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS MODAL

En los últimos años el análisis modal se ha convertido en una de las mejores herramientas para la invención y mejora de los diseños de estructuras dinámicas. No solo siendo puesto en práctica en el ambiente mecánico o aeronáutico, sino que se han encontrado grandes aplicaciones en el área civil, biomecánica y estructural. Para comprender esta tecnología es necesario tener el conocimiento base de los otros campos y así encontrar su aplicación dentro de éstos.

En la actualidad en los diseños mecánicos, aeronáuticos o de estructuras civiles complejos se busca una mayor ligereza, flexibilidad y sobre todo que éstos sean más fuertes. En la industria automotriz se necesitan estructuras que aguanten una gran cantidad de kilómetros y además que sean ligeras; en aeronáutica en el caso de los satélites se necesitan estructuras que trabajen en condiciones extremas, que sean duraderas y de fácil mantenimiento. Estas demandas intransigentes de hoy suelen hacer susceptibles las vibraciones no deseadas.

Otro factor importante hoy en día es el de incrementar la demanda, seguridad y rentabilidad de las estructuras y que además cumplan con las regulaciones de los propios gobiernos o con las necesidades del consumidor. Estas demandas se han convertido en todo un reto científico, siendo necesario el entendimiento de las estructuras ingenieriles, donde las vibraciones son de suma importancia, recayendo estos retos en las propiedades dinámicas, usando un análisis numérico, experimental o una combinación de ambos.

El análisis de elementos finitos modelado por una computadora ha provisto a los ingenieros una versátil herramienta para el diseño, especialmente en las propiedades dinámicas cuando se necesita un análisis cuidadoso. Este análisis dinámico requiere de una rigurosa teoría para su comprensión y utilización, en especial lo relacionado con las estructuras dinámicas. Y una parte de elementos finitos dinámicos es el análisis modal.

Un solo modelado por computador no puede determinar completamente el comportamiento dinámico de la estructura, porque no sabe con certeza las propiedades dinámicas de la misma, de la misma manera no sabe si hay amortiguamiento o no linealidad, como en el trato de modelado tradicional. Muchas veces las condiciones de frontera no son totalmente ciertas ya que son criterios que se toman para ayudar al modelado. Estos avances con las técnicas experimentales son un complemento para la determinación de las propiedades dinámicas de la estructura. Esto se logra gracias al análisis de las series de Fourier

de una forma digital. Estas técnicas experimentales son basadas en la teoría del análisis modal y dan un nuevo impulso a esto.

3.5.3. DEFINICIÓN DEL ANÁLISIS MODAL

El análisis modal es el proceso de determinación de las características dinámicas inherentes de un sistema en forma de frecuencias naturales, factores e amortiguamiento y los modos de forma, formulando un modelo matemático para este comportamiento dinámico. El modelo matemático es referido al modelo modal del sistema y a la información modal, es decir a la información de las características que nosotros conocemos.

La dinámica de las estructuras está físicamente descompuesta por frecuencia y posición. Esto se hace claramente evidente para la solución analítica de las ecuaciones diferenciales parciales de un sistema continuo como vigas o cuerdas. El análisis modal se basa en la respuesta de vibración de un sistema dinámico lineal que no varía con el tiempo, esto se puede expresar como la combinación lineal de movimientos armónicos simples, los cuales son llamados modos naturales de vibración. Este concepto es similar a la combinación de Fourier de las ondas de senos y cosenos para representar una onda compleja. Los modos naturales de vibración son inherentes para un sistema dinámico y completamente determinados por las propiedades físicas (masa, dureza, amortiguamiento) y por la distribución espacial. Cada modelo es descrito en términos de cada parámetro modal: frecuencia natural, el factor de amortiguamiento y la trayectoria de desplazamiento llamada modo de forma. Cada una corresponde a una frecuencia natural. El grado de participación de cada modo natural de vibración es determinado por las propiedades de excitación y por los modos de forma del sistema.

El análisis modal se basa tanto en la técnica experimental como en la teórica. El análisis modal teórico recae en el modelo físico del sistema dinámico abarcando las propiedades como masa, dureza, amortiguamiento. Estas ecuaciones se obtienen de las ecuaciones de ecuaciones parciales. Un ejemplo es la ecuación de la onda de vibración uniforme de una cuerda estableciendo su distribución de masa y propiedades elásticas. La solución de la ecuación se obtiene de las frecuencias naturales, de los modos de forma de la cuerda y de las respuestas de vibración forzada. Un modelo físico más real comprendería las propiedades de masa, dureza y amortiguamiento de forma de la distribución espacial, esto es llamado matriz de masa, dureza y amortiguamiento. Esta matriz es incorporada por una ecuación diferencial normal de movimiento. El principio de superposición en un sistema lineal dinámico nos permite transformar el problema en un sistema lineal más fácil de comprender. Esta solución es dada por los datos modales del sistema. Los nuevos software de análisis de elementos finitos aumentan la discretización de la mayoría de las estructuras dinámicas lineales, su fortalecimiento de capacidades y el avance del análisis modal teórico. Por otro lado la rápida evolución sobre la información adquirida y capacidad de procesamiento ha arrojado grandes avances en el área del análisis experimental.

3.5.4. APLICACIONES PRÁCTICAS DEL ANÁLISIS MODAL

En los últimos años ha habido un gran número de casos de aplicación del análisis modal cubriendo una gran parte del área de ingeniería, ciencia y tecnología. Se cree que en los próximos años el análisis modal va a tener un impulso significativo. Las aplicaciones prácticas del análisis modal están relacionadas en gran parte con el avance de la tecnología experimental. La mayoría de las aplicaciones prácticas descritas en libros han sido en la ingeniería aeronáutica, ingeniería automotriz, y de la ingeniería mecánica en particular, aunque no hay que menospreciar la aplicación del análisis modal que ha venido tomando con fuerza una forma interdisciplinaria.

En la industria automotriz, la gran comercialización y los aspectos de seguridad asociados al rediseño del vehículo han obligado a un mejor entendimiento de las propiedades dinámicas de la estructura del vehículo y la de cualquier cambio en el diseño. Lo que se está buscando hoy en día es la combinación del análisis modal experimental y del análisis de elementos finitos en el estudio de componentes automotrices.

Las estructuras de los nuevos vehículos son más ligeras y de alta resistencia. Una combinación del análisis modal experimental y el analítico, provee un diseño de las partes del vehículo y un incremento de las propiedades dinámicas del mismo. El análisis modal experimental como herramienta juega un papel fundamental en el estudio del ruido y fatiga del vehículo. Un análisis modal simple de un “cuerpo en blanco” o una subestructura es una típica aplicación. Una aplicación sofisticada que se ha logrado es en el panel del suelo del vehículo mediante sensibilidad modal, con lo que podemos estimar la vida de fatiga del vehículo. El análisis modal es una herramienta usada para entender la aparición del ruido en la estructura de los componentes del mismo.

El análisis modal también ha logrado una gran aceptación en el área de la ingeniería civil donde la parte más crítica es el análisis estructural. El conocimiento de la dinámica está ocupado en estructuras sujetas a esfuerzos sísmicos y con cargas de viento en las cuales se garantiza la aplicación del análisis modal. Estas estructuras son usualmente más largas que las estudiadas en mecánica, por eso las pruebas físicas son poco usadas. Después de un gran número de aplicaciones, se ha adquirido un conocimiento con predicción de respuesta de la vibración, pudiendo crear un ambiente de vibración a escala o cargas externas con las que se crean modelos matemáticos que se pueden derivar mediante el análisis modal.

3.5.4.1. EJEMPLO DE ANÁLISIS MODAL

Vamos a explicar el funcionamiento de un sistema vibratorio de un grado de libertad, que representamos mediante un cuerpo de masa “ m ”, paralelo al suelo, un muelle de rigidez “ k ” sujeto a la pared y un amortiguamiento de “ c ” que representa el amortiguamiento viscoso, también sujeto a la pared.

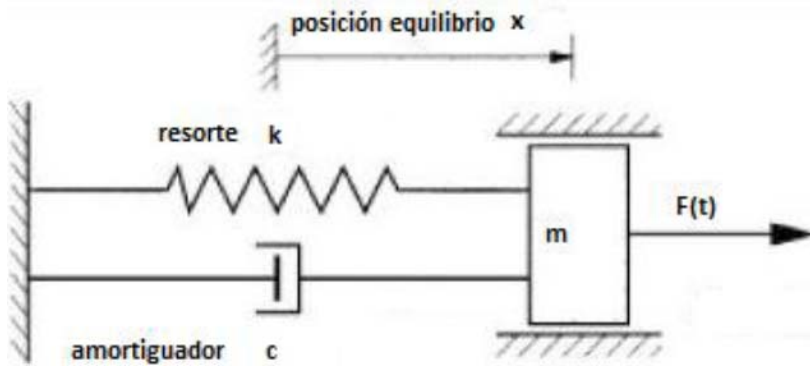


Figura 3.11. Sistema Vibratorio de un Grado de Libertad.

Al someter al sistema una excitación éste empezará a vibrar de una forma determinada y característica solo de ese sistema. Esta respuesta del sistema a la excitación dada podemos representarla en un grafico desplazamiento-frecuencia, que nos dará la respuesta modal del sistema. Pueden ser funciones no armónicas que podrán ser descompuestas en funciones armónicas gracias a la transformada de Fourier.

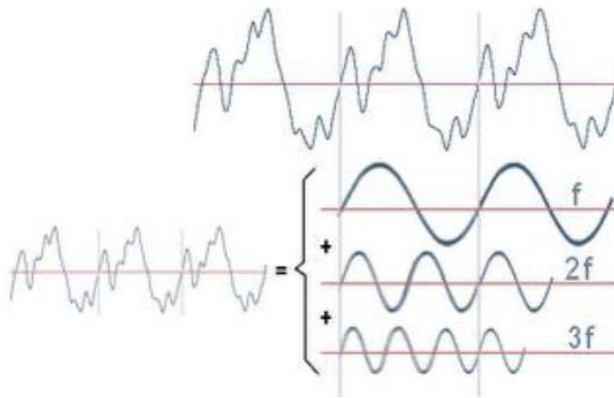


Figura 3.12. Descomposición de una Onda.

Esta vibración llamada vibración del sistema y su frecuencia natural, ω_n , se define como:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Cada modo tiene una forma propia de vibración. Para obtener todos los modos de vibración, así como sus frecuencias naturales, deberíamos realizar esta misma operación en cada uno de los posibles sistemas de un grado de libertad existentes. Un sistema con n grados de libertad da lugar a una vibración proveniente de la combinación de n sistemas de un grado de libertad. Se puede entender entonces, que cada estructura es una superposición de muchos sistemas de un grado de libertad y que al vibrar lo hacen como una combinación de modos fundamentales de vibración de sistemas de un grado de libertad.

Por ejemplo, resolviendo la ecuación diferencial del movimiento ondulatorio para obtener los modos normales de vibración de una cuerda fijada en sus extremos nos reporta las distintas frecuencias de vibración de la misma:

$$v^2 \frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} = \frac{\delta^2 \psi}{\delta t^2} \quad \rightarrow \quad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{n}{2L} \quad \text{siendo } n = 1, 2, 3 \dots$$

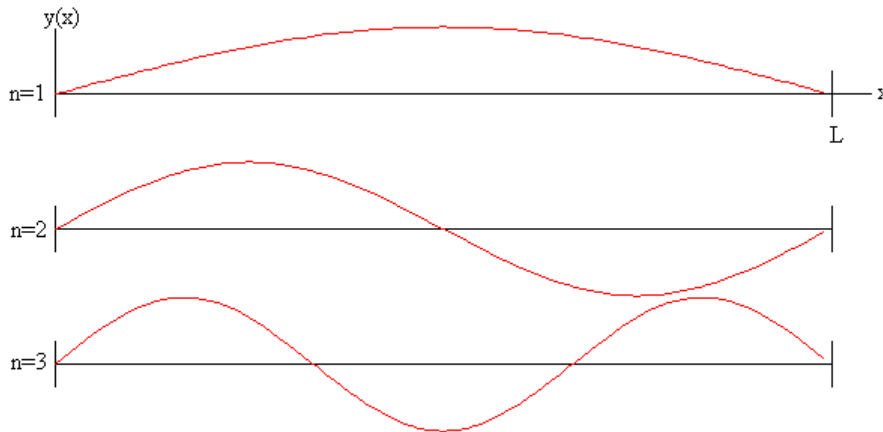


Figura 16. Modos de vibración de una cuerda fijada en sus extremos.

En sistemas unidimensionales y bidimensionales, se establecen los modos propios de vibración de una forma más o menos razonada y analítica, sin embargo, en sistemas tridimensionales el problema se complica para resolver las ecuaciones de movimiento ondulatorio.

Por ello, en el caso tridimensional, tras especificar las condiciones de contorno, debemos servirnos de un software como el que hemos utilizado en el proyecto, Creo Elements/Pro y su módulo 'Simulate', para la obtención y resolución de estas frecuencias propias en el análisis modal.

TEMA 4. MATERIAL RODANTE

4.1. INTRODUCCIÓN

La diferencia principal entre un vehículo ferroviario y otros tipos de transporte rodado es la orientación proporcionada por la vía. La superficie de los carriles no solo soporta las ruedas, sino también las guían en dirección lateral. Los carriles y los cruces cambian la dirección de rodadura de las ruedas y entonces determinan la dirección del viaje para los vehículos ferroviarios.

El órgano de rodadura es el sistema que proporciona un movimiento seguro del vehículo a lo largo de la vía. Incluye componentes tales como ejes montados con caja de grasa, la suspensión elástica, los frenos, órganos de tracción, y los dispositivos para la transmisión de las fuerzas de tracción y frenado al cuerpo del vehículo. Sus funciones principales son:

- Guía del vehículo a lo largo de la vía.
- Transmisión de la carga vertical desde las ruedas del vehículo a las vías.
- Aplicación de las fuerzas de tracción y frenado.
- Control de las fuerzas dinámicas debido al movimiento sobre las irregularidades de la vía, en curvas, cruces y después de cruces entre coches.
- Amortiguar las oscilaciones que aparecen.

4.2. BOGIE

El órgano de rodadura montado sobre una estructura independiente que permite girar en relativo respecto al cuerpo del vehículo se conoce como *"bogie"*.

Antiguamente los bogie solo capacitaban al órgano de rodadura a realizar pequeños giros en un plano horizontal respecto al cuerpo del vehículo pudiendo atacar las curvas con un ángulo. En la actualidad, sin embargo, los bogies transmiten todas las fuerzas (longitudinal, vertical y lateral) entre el cuerpo del coche y los ejes montados.

Un vehículo ferroviario está formado por una estructura y un chasis que consta de varias partes. Estas partes son: los órganos de rodadura, caja de grasa, suspensión, órganos de tracción y choque, frenos y accesorios. A este chasis se le denomina bogie.

El bogie se compone generalmente de dos ejes montados sobre un bastidor, que incorpora una suspensión propia llamada suspensión secundaria. Hay además una suspensión colocada entre el bogie y el bastidor que es la primaria, quedando la caja del vehículo unida al bastidor mediante el pivote.

Los principales componentes del bogie son: el chasis, los ejes montados, el equipo de suspensión, las cajas de grasa, la transmisión y la rueda. De los cuales vamos a realizar una breve explicación.

4.2.1. CHASIS

El chasis acomoda distintos equipos al bogie y se encarga de transmitir todas las fuerzas longitudinales, laterales y verticales entre los ejes montados y el cuerpo del vehículo. La mayoría de los chasis de bogies poseen una sola etapa de suspensión, bien entre la caja de grasas y el chasis o entre el chasis y el cuerpo del vagón. Algunos chasis de bogies de pasajeros utilizan las dos suspensiones, tanto la primaria como la secundaria, para de esta manera mejorar la aislación del exceso de las vibraciones que se producen durante la marcha.

A los bogies que disponen de una suspensión central se les denomina comúnmente como bogies de “tres piezas” y su uso está extendido en países como Canadá, Estados Unidos, China, Australia, etc. El chasis de tres piezas consiste del refuerzo y dos chasis laterales que están conectados elásticamente por muelles helicoidales y un sistema de suspensión central que consiste en un nido de muelles helicoidales y cuñas de fricción, los cuales aparte resisten cargas asimétricas y mantienen al chasis cuadrado en el plano.

El cuerpo del vagón se conecta al chasis del bogie por medio de un plato central plano y soportes laterales rígidos. Los chasis laterales se apoyan en los ejes montados y dependiendo de la caja de grasas la unión entre estos será distinta para cada caso.

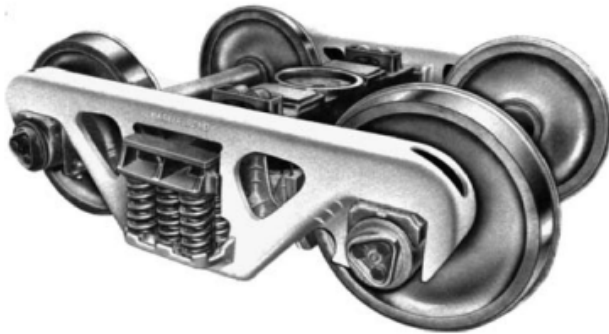


Figura 4.1. Chasis de Bogie.

4.2.2. EJES MONTADOS

Los ejes montados generalmente están formados por dos ruedas que se conectan rígidamente por un eje común. El eje montado es aguantado por rodamientos montados en la caja de grasa. Las principales funciones del eje montado son:

- Determina la distancia entre vehículo y vía.
- Proporcionar los medios de transmisión de las fuerzas de frenado y tracción a los carriles.
- Dar la orientación que determina el movimiento sobre el ancho del carril.

El diseño del eje montado depende del tipo de vehículo (arrastre o tracción), también de la construcción del centro de la rueda, la posición de los rodamientos (interior o exterior) y el tipo de sistema de frenado (zapata, disco sobre el eje o disco sobre la rueda).

A pesar de la gran variedad de diseños todos los ejes montados tienen dos características comunes: la conexión rígida de las ruedas en el eje y el perfil de la rueda.

En las curvas, el carril exterior de la vía tiene un radio mayor que el carril interior. Esto implica que una rueda cilíndrica tiene que rodar más rápido en el carril exterior que en el interior. Como el movimiento de rotación de las ruedas por unidad de tiempo es el mismo tanto para la rueda exterior como para la interior, tal movimiento no puede ocurrir por rodadura pura. Como ambas ruedas realizan distancias de viaje iguales, una de ellas o ambas por tanto deslizará, incrementado de esta manera la resistencia a la rodadura y causando desgaste de ruedas y carriles. La solución es mecanizar la superficie de rodadura de las ruedas a un perfil cónico con ángulo de inclinación y variable con el eje del eje montado. La posición del punto de contacto cuando el eje montado está en la posición central en los carriles, determina el conocido como "tape-circle", donde se mide el diámetro de la rueda. En la parte interior de la rueda, el perfil cónico tiene una pestaña la cual previene descarrilamiento y guía el vehículo una vez que las fuerzas de cortadura existentes entre rueda y carril superan la resistencia del contacto rueda-carril.

Aquí podemos observar los principales tipos de ejes montados:

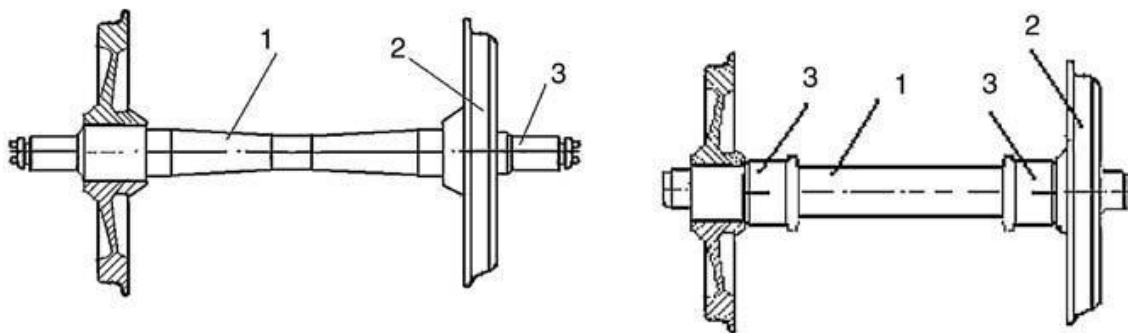


Figura 4.2. Eje montado con rodamientos externos (Izquierda) e internos (Derecha).

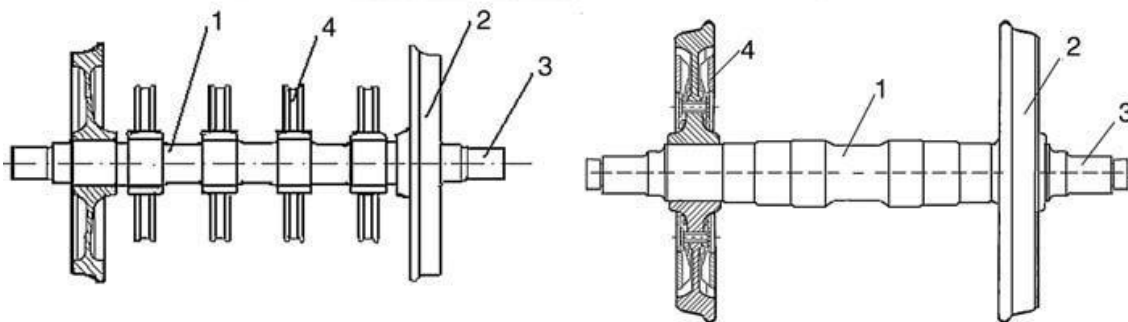


Figura 4.3. Eje montado con disco de freno en eje (Izquierda) y rueda (Derecha).

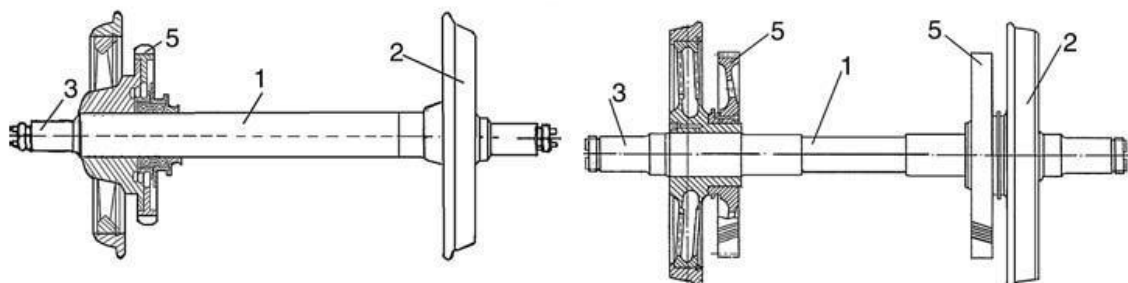


Figura 4.4. Eje montado con posición simétrica (Izquierda) y antisimétrica (Derecha).

Un eje montado con perfiles cónicos puede moverse lateralmente en una curva de tal forma que la rueda exterior está rodando en una trayectoria de mayor radio (debido al ángulo de conicidad) que la interior. Se puede ver que para cada radio de la curva solo existe un valor de conicidad que elimina el deslizamiento. Como los diferentes ferrocarriles van variando los radios de curva con el tiempo, la forma de perfil de la rueda que proporciona mínimo deslizamiento depende de las características de la vía. Las administraciones ferroviarias normalmente especifican los perfiles de rueda permisibles para sus infraestructuras y el grado de desgaste permitido antes de que se requiera un reperfilado.

A pesar de la gran variedad de perfiles de rueda existen un número de características comunes. La anchura del perfil está comprendida normalmente entre 125 y 135 mm y la altura de la pestaña está entre 28 y 30 mm. El ángulo de inclinación de la pestaña está entre 65° y 70°. Alrededor del "tape-circle" la conicidad es 1:10 o 1:20 para material rodante común. Para material rodante de alta velocidad, la conicidad se reduce a 1:40 o 1:50 para prevenir el movimiento del lazo. Algunos perfiles modernos de rueda, particularmente para material rodante de pasajeros, no son cónicos pero se diseñan desde unas series de radios que aproximan la rueda a un perfil usado. Con esto se intenta dar una forma estable y prevenir cambios significativos de conicidad que puede aparecer en ruedas cónicas con desgaste.

Para perfiles cuya forma no sea puramente cónica, bien sea por diseño por desgaste, se le aplica el término equivalente de conicidad. Es el cociente de la diferencia de los radios de rodadura entre el doble del deslizamiento lateral del eje montado:

$$\gamma_{eq} = \frac{\Delta R}{2y}$$

Como la rueda se desgasta el perfil puede modificarse significativamente dependiendo de un gran número de factores como el perfil de curvatura de la ruta, nivel de fuerzas de tracción y frenado aplicadas, forma del perfil medio del carril, régimen de lubricación y diseño de la suspensión.

Cuando hay un desgaste extremo puede incrementar el peligro de descarrilamiento, sobretodo en cruces. Normalmente se realizan reperfilados a su forma de diseño periódicamente, sin necesidad de desmontar el eje del vehículo.

Está claro que el contacto entre los perfiles de la rueda y el carril puede verse modificado dependiendo del nivel de desgaste existente, pudiendo haber un único punto de contacto, dos puntos de contacto o un contacto en toda la superficie



Figura 4.5. Contacto rueda-carril en un único punto (a), dos puntos (b) o en toda la superficie (c).

En el caso de un único punto de contacto este se produce entre la parte cónica o zona gastada de la banda y la esquina redondeada del carril. Así la rueda se desgasta rápidamente tomando la forma del carril. Cuando hay dos puntos de contacto, la rueda además toca el carril

con la pestaña. Al haber dos radios diferentes de contacto provoca un deslizamiento intensivo y un desgaste rápido de pestaña. El contacto en toda la superficie de rodadura aparece cuando hay un desgaste en todo el ancho de la banda y del carril.

4.2.3. CAJA DE GRASA

Es el dispositivo que permite rotar al eje montado, incluyendo el alojamiento del rodamiento y los soportes para la suspensión primaria uniendo el eje montado al bogie o al cuerpo del vehículo. Es la encargada, además, de transmitir las fuerzas (longitudinales, laterales y verticales) desde el eje montado a los demás elementos del bogie.

Hay cajas de grasa con los rodamientos en la parte exterior y otras los llevan en la parte interior. Existen distintos rodamientos que puede llevar la caja de grasa, como son los planos o de rodillo.

Las cajas de grasa con rodamientos planos están formadas por el alojamiento (1), el propio rodamiento (2), la carcasa de rodamiento (3), que se encarga de transmitir las fuerzas desde la caja de grasa al rodamiento, un dispositivo de lubricación (4), para lubricar el eje del rodamiento, los precintos frontal (6) y trasero (5) que previenen la suciedad y los cuerpos extraños dentro de la caja, pudiendo el precinto frontal ser retirado para comprobar el estado del rodamiento y añadir lubricante.

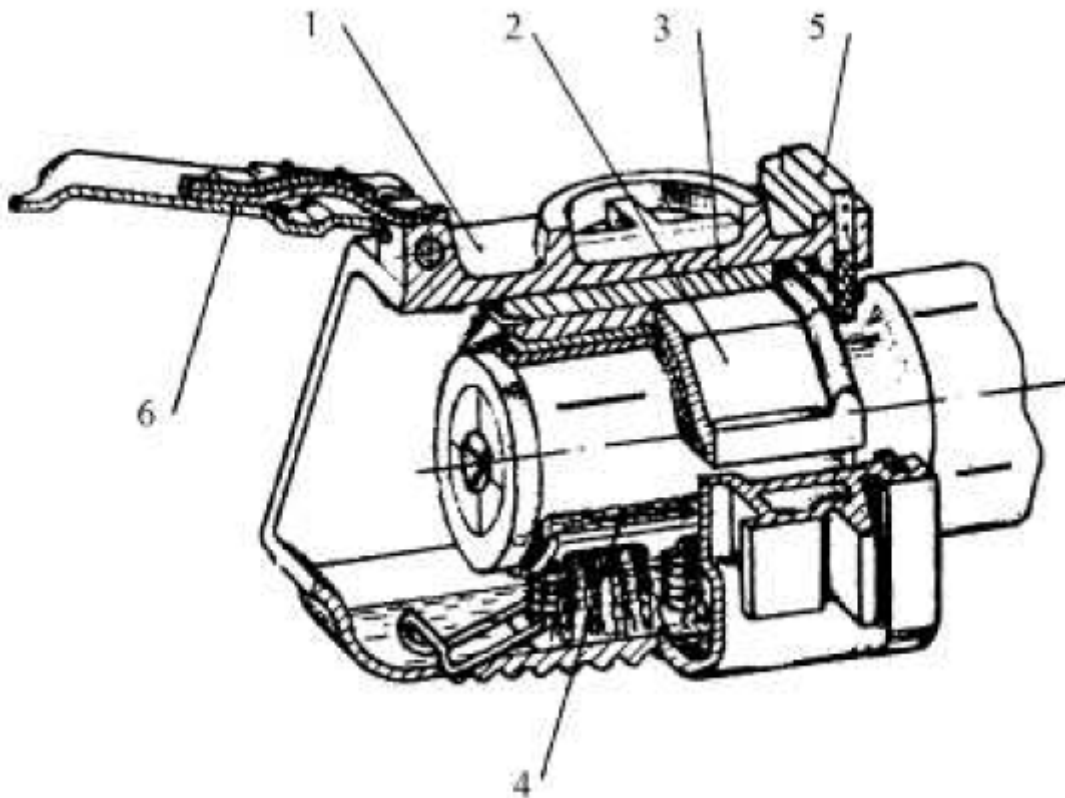


Figura 4.6. Caja de grasa.

Las fuerzas verticales y longitudinales se transmiten por la superficie interna del rodamiento y las fuerzas laterales por sus caras.

Las cajas de grasa con rodamientos planos se están quedando obsoletas ya que tienen varias desventajas como son: un elevado coeficiente de presión cuando se parte del reposo, poca fiabilidad, una labor de mantenimiento laboriosa, y una contaminación con el medio.

Sin embargo, atendiendo al comportamiento dinámico del vehículo este tipo de cajas de grasa tienen aspectos positivos. También hay cajas de grasa con rodamientos planos que no necesitan lubricación aunque su uso es todavía minoritario.

Las cajas de grasa con rodamientos de rodillos se pueden clasificar según sus rodamientos (cilíndricos, cónicos o esféricos) y según el método de ajuste (por presión o por calentamiento).

Los rodamientos de rodillos cilíndricos tienen una elevada capacidad dinámica en la dirección radial, pero no transmiten fuerzas axiales. Según la experiencia en el ámbito ferroviario se sabe que las caras de los rodillos pueden soportar esfuerzos laterales. Pero para hacer esto de forma satisfactoria es necesario regular tanto el diámetro como la longitud de los rodillos y la holgura axial y radial.

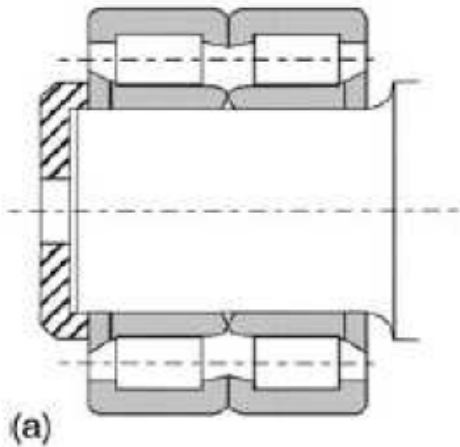


Figura 4.7. Rodamiento de Rodillos Cilíndricos.

Los rodamientos de rodillos cónicos transmiten las fuerzas axiales a través de la superficie cilíndrica debido a su inclinación para la rotación del eje. Es necesario mantener las tolerancias entre los diámetros de las bolas y las holguras casi un orden de magnitud más ajustadas que para rodamientos cilíndricos. Los rodamientos cónicos tienen un elevado coeficiente de fricción con respecto a los rodamientos cilíndricos y por lo tanto generan más calor. Esto produce un incremento en el consumo en la tracción y crea problemas para los diagnósticos de las unidades de la caja de grasa durante el movimiento.

Recientemente se empezaron a usar rodamientos antifricción cuya característica principal es que el rodamiento no se desmonta por ajuste sino que es instalado como una pieza única.

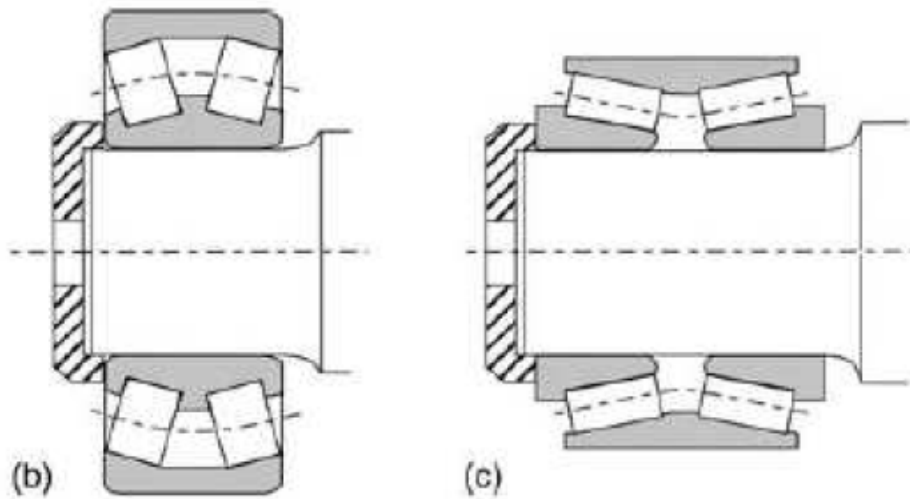


Figura 4.8. Rodamientos de Rodillos Cónicos.

Los rodamientos de bolas no han sido mayoritariamente usados debido a los elevados costes y bajas capacidades de carga, aunque su ventaja es que distribuye mejor la carga. A menudo los rodamientos de bolas están combinados con rodamientos de rodillos en aplicaciones ferroviarias para transmitir las fuerzas axiales.

El material rodante de alta velocidad tiene a menudo tres rodamientos alojados en la caja de grasa, dos transmitiendo fuerzas radiales y uno, a menudo de bolas, transmitiendo fuerzas axiales.

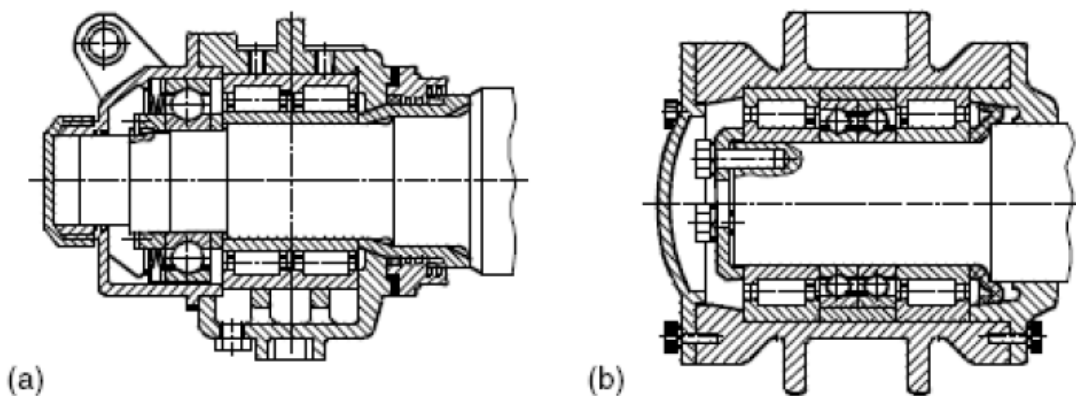


Figura 4.9. Rodamientos Triples de Alta Velocidad de Japón (a) y Francia (b).

4.2.4. RUEDA FERROVIARIA

Es junto con el eje, la parte más crítica del material rodante montado. Fallos mecánicos o abusos en las dimensiones de diseño pueden causar descarrilamientos.

El modo de desplazamiento de los ferrocarriles es en su mayoría el de rueda enteriza de acero rodado sobre un carril de acero, con excepción de diversos casos como son los trenes de levitación magnética y los trenes que usan ruedas neumáticas.

La misión de las ruedas en el tren es el de sustentar, guiar y transmitir al carril los esfuerzos para lograr circular en curva, acelerar y frenar. Cada una de estas acciones induce esfuerzos mecánicos y térmicos en las ruedas.

El mantenimiento y diagnóstico de posibles daños en la rueda es fundamental para la seguridad del tren, ya que la aparición de fisuras y grietas puede ocasionar el descarrilamiento del tren, con sus posibles nefastas consecuencias.

Las partes más importantes de las ruedas son:

- **Pestaña:** Es el aro saliente en el borde de la llanta de un vehículo ferroviario, cuya función es la de evitar el descarrilamiento.
- **Banda de Rodadura:** Es la superficie de contacto entre llanta y carril, es la parte que rueda sobre el carril.
- **Llanta:** Es la corona circular metálica, que calada sobre el núcleo, constituye el volumen de la superficie de rodadura sobre el carril.
- **Velo:** Es la corona metálica que une la llanta con el cubo.
- **Cubo:** Es el elemento mecánico que establece la unión de la rueda y el eje.
- **Límite Máximo de Desgaste:** Es el límite hasta el cual se puede reperfilar la rueda en condiciones de seguridad.
- **Alojamiento de Calado:** Es el dispositivo mediante el cual se introduce aceite a presión para el calado de la rueda y el eje.

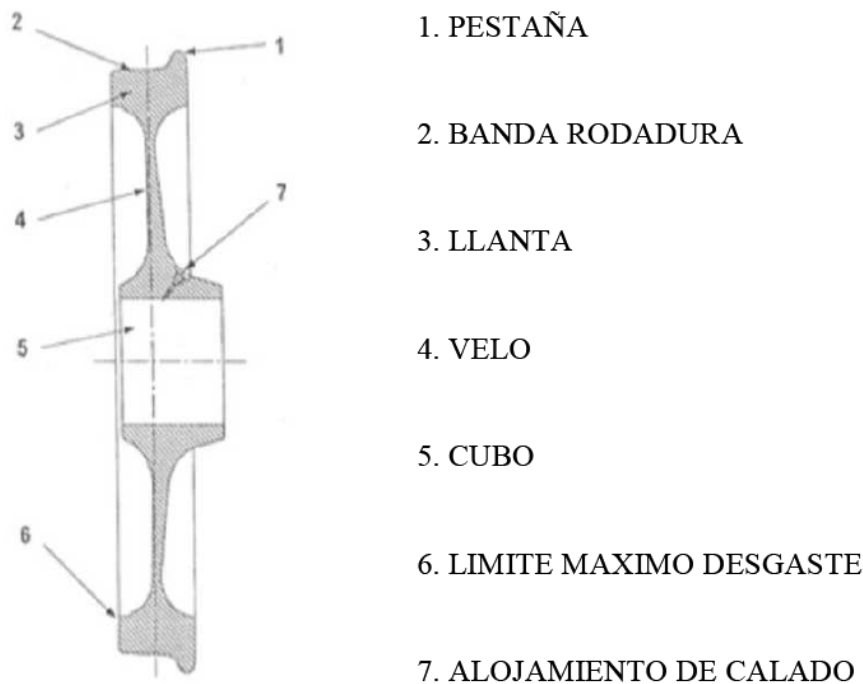


Figura 4.10. Partes de la Rueda I.

La rueda de ferrocarril se constituye sobre un sólido de revolución alrededor de un eje $\alpha-\alpha$ y que consta de una llanta (A), un cubo (E) y un velo (C), presentando sobre la llanta un plano mediano teórico (Z) que pasa por el punto de contacto rueda-carril y es perpendicular a dicho eje $\alpha-\alpha$. La unión del velo a la llanta es mediante una superficie interior de acuerdo y exterior, al igual que la unión del velo al cubo. En el velo existe una línea meridiana teórica que va desde el acuerdo (P) del velo con la llanta al acuerdo (T) del velo con el cubo, presentando el velo entre el acuerdo del velo con la llanta y el acuerdo del velo con el cubo una primera, una segunda y una tercera curvatura concatenadas con doble punto de inflexión, siendo el plano de la cara exterior (1) de la llanta aproximadamente tangencial a la superficie exterior de la segunda curvatura del velo.

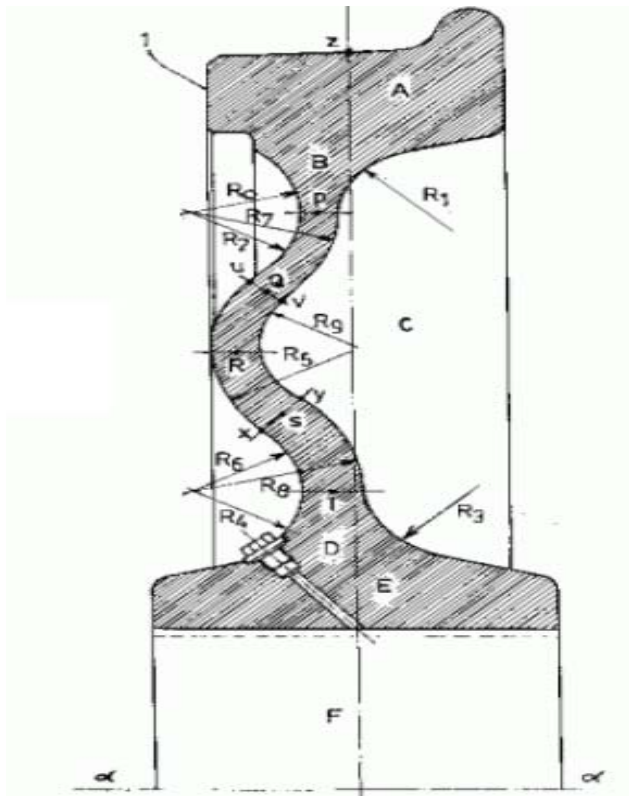


Figura 4.11. Partes de la Rueda II.

4.2.4.1. TIPOS DE RUEDA

Rueda Monobloque: La llanta y el velo se unen mediante un radio de acuerdo, perteneciendo la llanta y el velo a la misma unidad.

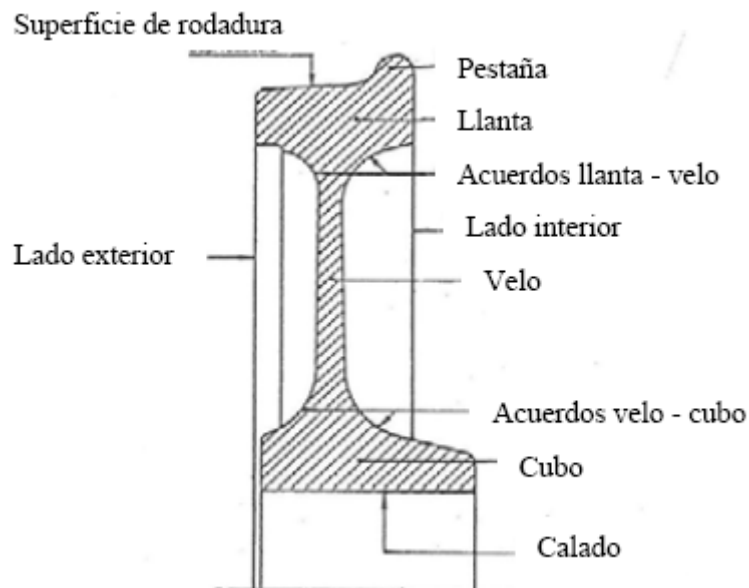


Figura 4.12. Rueda Monobloque.

Rueda de LLanta: La llanta se une al velo a través de un aro metálico llamado cincho, con calado en caliente. En este caso es posible cambiar la llanta conservando el velo y el cubo.

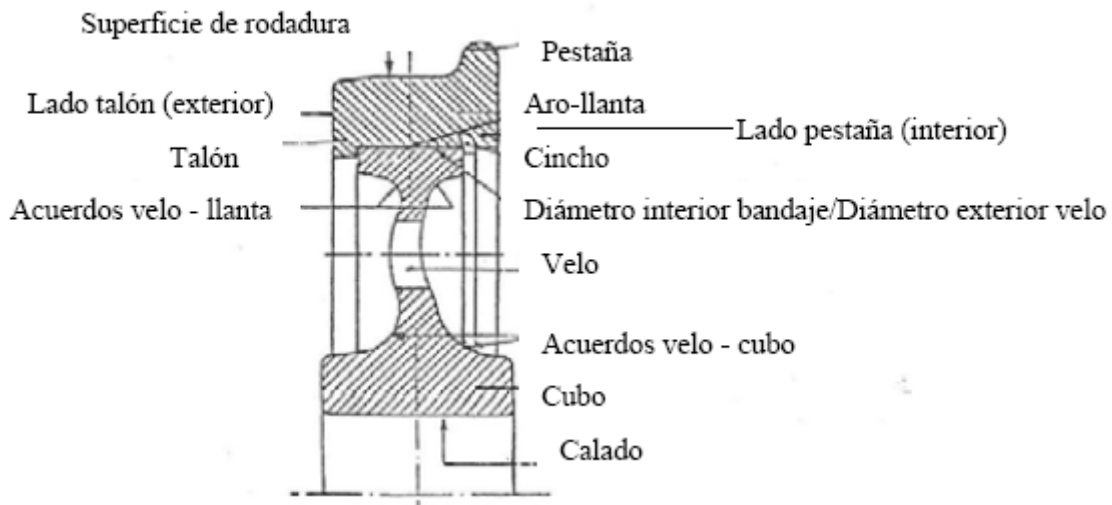


Figura 4.13. Rueda de LLanta.

Rueda Elástica: La llanta se une al velo mediante una banda de goma. También es posible cambiar la llanta conservando el cubo y el velo. La banda elástica amortigua ruidos y vibraciones y es muy usada en las ruedas de los tranvías y metros ligeros.

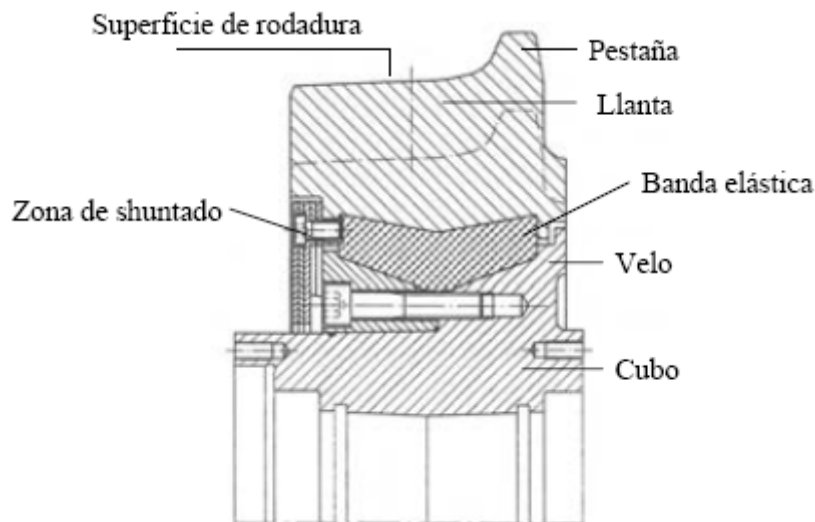


Figura 4.14. Rueda Elástica.

4.3. FABRICACIÓN DE RUEDAS

Actualmente los mercados demandan ruedas de ferrocarril con unas tolerancias muy ajustadas, pero a la vez que tengan una vida de servicio lo más larga posible. Para poder satisfacer esta demanda y a la vez ser capaces de producir de forma rentable es necesario invertir en máquinas ultramodernas y en tecnología sofisticada.

En los últimos tiempos se han producido un incremento de las velocidades de los trenes, con lo que hay que tener dos aspectos muy a tener en cuenta, uno es disminuir lo máximo

posible los consumos energéticos y otro es mejorar el confort de los pasajeros al máximo. Para ellos es indispensable controlar el peso de las masas rodantes, reduciendo los pesos al máximo posible y mejorando su resistencia para soportar las tensiones que van en aumento debido a las mayores cargas radiales y laterales en las ruedas y también al aumento de las cargas térmicas.

Las ruedas de acero pueden ser fabricadas por dos métodos: forja, método más utilizado en Europa o por colada, que está más extendido en Estados Unidos. Además las llantas de las ruedas suelen ser sometidas a procesos de temple y revenido, dejando tanto el cubo como el velo en estado normalizado. Comparaciones de estudios entre ruedas forjadas y ruedas coladas muestran claramente la superioridad de las ruedas forjadas atendiendo a la tenacidad de fractura. Las ruedas forjadas ofrecen una máxima seguridad siendo perfectas para el uso en trenes de pasajeros de alta velocidad. El tratamiento de la llanta de la rueda influye en evitar el desarrollo y propagación de fisuras térmicas, influyendo por otra parte la forma de la rueda en la distribución de tensiones y en la estabilidad sobre el ancho del carril.

En los métodos de fabricación de las ruedas de ferrocarril hay que tener en cuenta los requerimientos técnicos y conseguir que las técnicas de producción sean económicas, mejorando la utilización del material.

4.3.1 FORJA EN BLANCO

El material de partida son bloques a partir lingotes o barras de material continuo. Es necesario un estricto control del peso de los bloques, pues la masa de los bloques es un parámetro fundamental para la obtención de una rueda que cumpla las especificaciones de diseño. Primero se cortan los bloques de material para luego ser calentados hasta la temperatura de forja en el horno rotatorio. Una vez calentados los bloques, se llevan fuera del horno y se les somete a agua a alta presión para limpiar impurezas. Luego se pesan y son sometidos a dos operaciones de forja, pasando así la rueda a llamarse rueda en blanco.

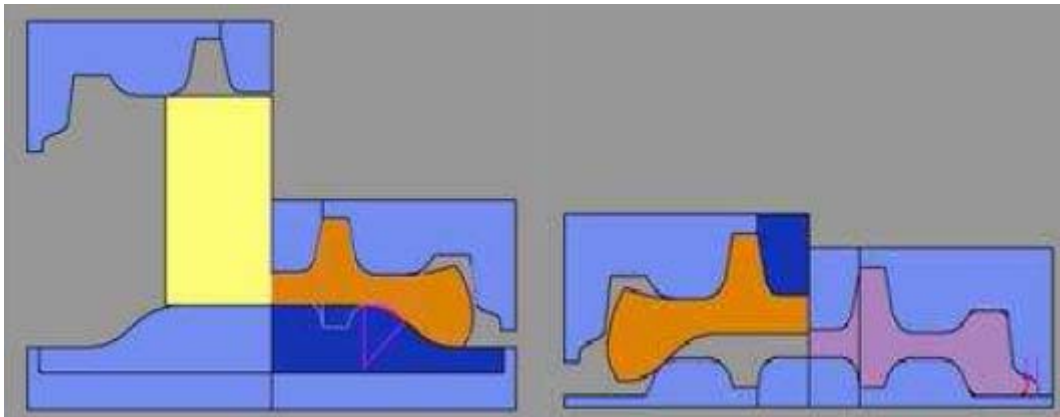


Figura 4.15. Proceso de Conformado de la Rueda en Blanco.

Tras la operación de limpieza un manipulador coloca el bloque en la primera prensa hidráulica de 50 MN y le aplica presión. Luego el bloque es centrado con el dispositivo de centrado que está incorporado en la prensa. En esta operación se consigue una aproximación del perfil final de la rueda. El manipulador se encarga de llevar la rueda en blanco de la prensa de 50 MN a la de 90 MN, para luego realizar la perforación de la parte central de la rueda mediante un cilindro penetrante.



Figura 4.16. Preforma Final en la prensa de 90 MN.

Una vez tenemos la preforma final, el manipulador de carga amarra la preforma por los laterales para introducirlo en la máquina de conformado de rodillos, siendo la posición de la rueda vertical.

4.3.2. CONFORMADO

La máquina de conformado tiene un control muy flexible para el ajuste de todas las herramientas. El conformado de la preforma por rodillos se realiza en tres pasos, usando los distintos rodillos que posee la máquina

Después de que la rueda en blanco se sitúa en la máquina de conformado por rodillos, los rodillos de centrado sitúan la rueda en la posición de conformado, tras lo cual se acercan los rodillos encargados de conformar el velo, situándose sobre la rueda. Este es el primer paso en la secuencia de conformado, aunque no es una operación de conformado pues no se ejerce ninguna presión sobre la preforma.

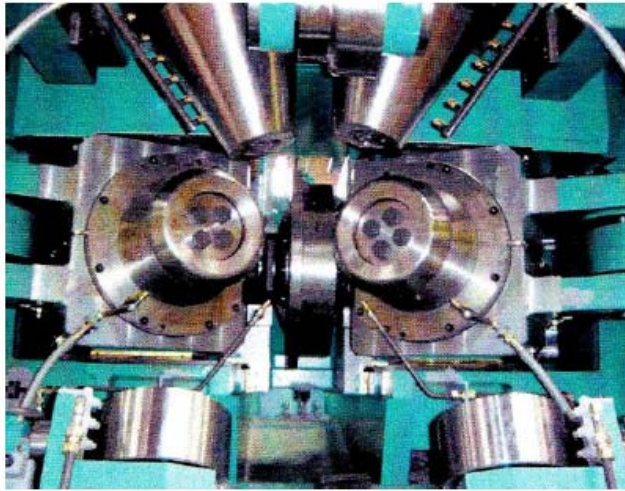


Figura 4.17 Rodillos de la Máquina de Conformado.

El segundo paso consiste en la realización de las operaciones de conformado, los rodillos del velo empiezan a ejercer presión sobre la preforma. Simultáneamente al segundo paso comienza el tercero, los rodillos laterales conforman el material, son los rodillos de la llanta. La distancia entre los rodillos del velo, espesor relativo del velo, es controlada durante el proceso y depende del crecimiento del diámetro de la rueda, conformando así los rodillos la forma del velo programada. La altura de la llanta se consigue en el tercer paso por el ajuste de los rodillos laterales.

La rueda se conforma hasta su forma final, existiendo un estricto control del proceso, mediante los ajustes de las herramientas en cada momento.

En este método de conformado de rodillos, el material fluye desde la llanta hacia el velo. Mediante este proceso de conformado se generan tensiones de compresión en la dirección del conformado. Esto influye favorablemente en las propiedades de las ruedas, así como en la exactitud de las medidas de las mismas.

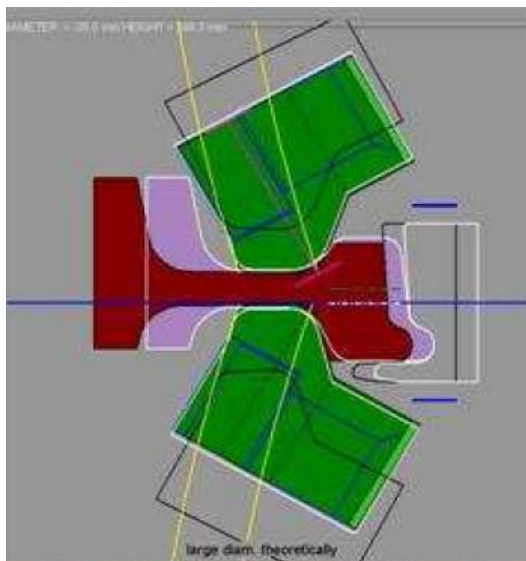


Figura 4.18. Proceso de Conformado.

Los rodillos del velo ejercen presión sobre la rueda girando al mismo tiempo, con lo que el espesor del velo empezará a disminuir dependiendo de la presión ejercida. El movimiento de los rodillos desde la llanta hacia el cubo hace que la rueda aumente su diámetro, extendiéndose el material en dirección al cubo.

Un poco antes de la búsqueda del diámetro final de la pieza se inicia una fase de calibrado automático, por reducción de las velocidades ajustadas. Así se consigue la rueda final con una total precisión en su reproducción.

Las fuerzas de conformado se generan de forma hidráulica. Con dispositivos como válvulas supervisadas por regulación electrónica, se adaptan instantáneamente con mucha sensibilidad y precisión los movimientos y presiones de operación requeridos en el proceso de conformado.

4.3.2.1. DISPOSITIVOS DE MEDIDA LÁSER OD

Este dispositivo que lleva incorporado la maquina, situado en un alojamiento protector en frente de la maquina, detecta de manera precisa y en cada momento el diámetro de la rueda durante el conformado.

Las medidas son instantáneamente transmitidas al sistema de control de la máquina y se transforman en señales para el proceso de control de la máquina. Las dimensiones actuales y nominales de la rueda se pueden ver en cada momento en un CRT en la cabina de control, siendo más sencilla la supervisión del proceso.

4.3.2.2. CONTROL ELECTRÓNICO DE LA MÁQUINA DE CONFORMADO

Los dispositivos para el control de posición de la pieza, control de presión y ajuste de los rodillos, tienen en cuenta las velocidades de rodillos y pieza en cada momento. Las fuerzas y el par motor son monitorizados y si se alcanza algún límite de capacidad de la maquina, automáticamente se hacen los cambios necesarios para entrar en el rango permitido.

El software de control permite en arranque automático y el control del proceso por ordenador. Podemos destacar los criterios esenciales de los controles:

- El conformado de alta precisión se realiza optimizando la utilización de la maquina.
- Las secuencias del conformado se reproducen automáticamente según las especificaciones requeridas.
- La programación del conformado es realizada por un operario a través de un sistema de comunicación con teclado y CRT.
- Se asegura así la reproducción de la secuencia del conformado.

4.3.3. DEFORMACIÓN DEL VELO

Un manipulador toma las ruedas desde la zona de descarga de la máquina de conformado y las lleva a la parte inferior de la matriz de la prensa para la deformación del velo de la rueda. Aquí se le da al velo la forma de diseño especificada, cónica, ondulada, etc.

Otro manipulador traslada la rueda desde la prensa de deformación del velo, hasta la máquina de marcado. Tras el marcado se lleva a una máquina de medida láser 3D.

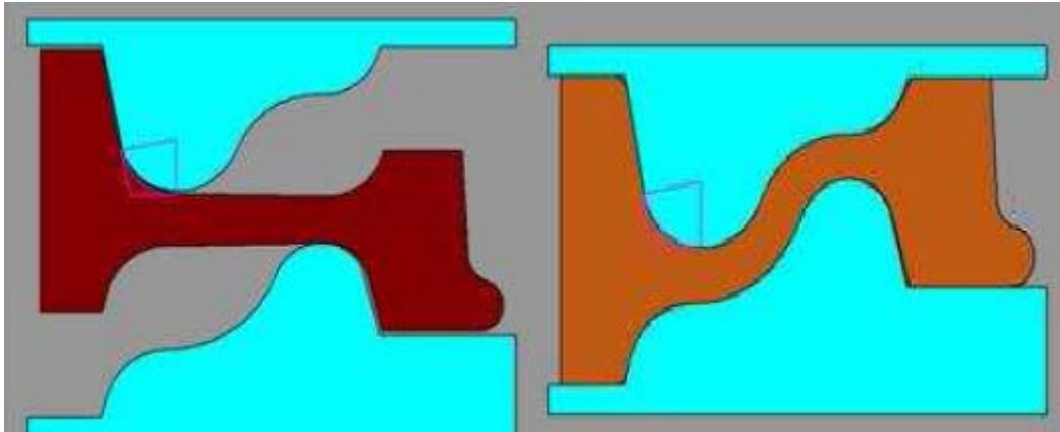


Figura 4.19. Matriz de Deformación del Velo.

4.3.4. CONTROL DIMENSIONAL CON MAQUINA LÁSER 3D.

Es un sistema de control óptico-electrónico, que consta de tres cabezales de medida basados en tecnología láser.

Se dispone en una mesa rotatoria de 360° para explorar todas las partes de la rueda. Las desviaciones de las medidas son reflejadas en un CRT en distintos colores y se gravan en un archivo de documentación. A través de esta información se puede hacer variaciones en la línea de producción para evitar salirse de las especificaciones.



Figura 4.20. Máquina Láser 3D.

Después de los análisis de medidas la rueda es llevada hasta las instalaciones de tratamiento térmico y mecanizado.

4.3.5. TRATAMIENTO TÉRMICO

El tratamiento de temple al que se somete la llanta consiste en calentar la rueda en un horno hasta los 827°C para eliminar las tensiones generadas durante el proceso de forjado. Luego se enfría la rueda 345 seg. Al ser sometida la rueda a una temperatura superior a la de transformación de fase se produce una transformación de austenita a perlita durante el enfriamiento. Lo que da a la rueda su alta dureza es la microestructura perlítica.

En este punto la llanta se ha enfriado y se expande, mientras que el velo y el cubo siguen calientes y relativamente más blandos. La rueda se deja enfriar al aire durante aproximadamente 4 minutos para dejarla posteriormente en un horno a una temperatura de 480 °C durante dos horas, para aliviar algunas de las tensiones generadas durante el enfriamiento de la llanta. Durante este período el velo y el cubo se enfrían por debajo del punto de transformación y se contraen tirando de la llanta, que está más rígida. Este fenómeno induce tensiones residuales de compresión en la llanta. Finalmente la rueda se deja enfriar a temperatura ambiente durante aproximadamente 6 horas.

Como resultado tanto la parte inferior de la llanta como el velo quedan sometidos a tracción, mientras el resto de la llanta queda sometido a compresión. Las tensiones residuales a compresión impiden que se formen y crezcan fisuras, suponiendo un beneficio en la seguridad de la rueda.

El campo de tensiones residuales llega hasta una profundidad de 40 mm y al desgastarse y ser reperfilada la rueda pierde este campo de tensiones.

La sensibilidad al agrietamiento térmico aumenta con el contenido en carbono de la rueda. El problema es que si reducimos el contenido de carbono disminuye la dureza y la resistencia al desgaste, por lo tanto tenemos que compensarlo con aleantes. Es por eso que es mejor modificar la microestructura para lograr un tamaño de grano más pequeño que aumentar el contenido de carbono en el acero, si se quieren mejorar las características de resistencia.

En la zona de la llanta las proporciones de ferrita son menores y así aumenta la dureza en dicha zona, todo lo contrario ocurre en la zona del velo y la pestaña.

Hasta una profundidad de 0,03 mm desde la superficie, la microestructura es una mezcla de ferrítica de carburo, con muchas microgrietas orientadas a ángulos entre 0° y 30° de longitudes aproximadas entre 0,015 y 0,025 mm. El ancho de las mismas varía entre 0,0002 y 0,0030 mm y la distancia entre ellas está entre 0,01 y 0,50 mm. La siguiente zona es la de transición al material base (aproximadamente 3 mm).

Para asegurar que no se producen defectos macroscópicos tras la fabricación, a petición de las empresas de trenes y mantenimiento de los mismos, todas las ruedas son inspeccionadas por el proveedor mediante la técnica de ultrasonidos.

En Europa las normas se suministran según la ficha UIC 812-3 “Especificación Técnica para el suministro de ruedas monobloque de acero no laminado para el material rodante motor y remolcado” en 8 calidades.

Calidad	Composición química (% máximo en peso)											Propiedades mecánicas		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	1+2+3	R _m N/mm ²	A (%)	KU (J)
R1	0.48	0.50	0.90	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	600-702	12-18	15
R2	0.58	0.50	0.90	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	700-840	9-14	10
R3	0.70	0.50	0.90	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	800-940	7-10	10
R6	0.48	0.40	0.75	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	780-900	15	15
R7	0.52	0.40	0.80	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	820-940	14	15
R8	0.56	0.40	0.80	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	860-980	13	15
R9	0.60	0.40	0.80	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	900-1050	12	10

1+2+3: Cr+Mo+Ni

Figura 4.21. Ficha UIC 812-3.

La ficha UIC 812-3 estuvo en vigor hasta Agosto de 2006, siendo luego sustituida por la norma UNE-EN 13262 “Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ruedas. Requisitos de producto”.

4.3.6. SOLICITACIONES A LAS QUE ESTÁN SOMETIDAS LAS RUEDAS

Tanto las fuerzas de carga como las de guiado que deben soportar las ruedas durante su vida de servicio, hacen que las ruedas se vean sometidas a grandes solicitaciones. La banda de rodadura es la parte que más sufre, soportando mayores esfuerzos aquellas ruedas que sean motrices o en las que se aplican los frenos, apareciendo en ellas esfuerzos por deslizamiento y esfuerzos térmicos.

La clasificación de los solicitaciones a las que se somete a las ruedas puede hacerse desde el punto de vista del tiempo transcurrido en el que se manifiesta o desde el punto de vista del origen de los esfuerzos.

Clasificación según el punto de vista del espacio de tiempo en el que se manifiestan las solicitaciones:

- Solicitaciones Constantes o de variación lenta en el tiempo: Son las tensiones residuales que aparecen durante las operaciones de fabricación, durante el calado de ruedas y ejes. También son las tensiones permanentes que aparecen en las operaciones de frenado.
- Solicitaciones Intermitentes en el tiempo: Son las tensiones que se deben a la existencia de gradientes térmicos en la rueda.
- Solicitaciones Cíclicas: Se producen en la zona de contacto rueda-carril y son tensiones ligadas a la rodadura, debidas a cargas verticales, tracción y pseudodeslizamiento. En la zona de contacto rueda-carril se puede producir deformación plástica a pesar de que las cargas no sean muy elevadas. Tras los primeros ciclos de cargas se introducen tensiones residuales. El material además se endurece, debido a estos esfuerzos.

Clasificación según el punto de vista del origen de los esfuerzos:

▪ Solicitaciones Térmicas: Provocadas por las frenadas y por los esfuerzos motores o retardadores cuando se produce deslizamiento ligado a pérdida de adherencia en el contacto rueda-carril. Estas solicitaciones afectan sobre todo a las capas superficiales, pudiendo llegar a producir transformaciones metalúrgicas en el acero (templado de las zonas que han patinado). Frenadas intensas o anormales pueden crear tensiones que pueden sobrepasar en ciertas zonas el límite elástico del material y provocar una modificación del campo de tensiones residuales, pudiendo de esta forma favorecer el desarrollo de grietas en profundidad.

▪ Solicitaciones Mecánicas: Tanto la sustentación como el guiado producen solicitaciones mecánicas que se resumen en un esfuerzo vertical aplicado sobre la superficie de la banda de rodadura y una fuerza lateral sobre la pestaña de la rueda. Las fuerzas horizontales y transversales de rodadura se componen de una parte casi estática (variación muy lenta) y una parte dinámica. Con una alineación exacta de los ejes, las fuerzas transversales podrían excluirse, excepto a lo que se refiere a fuerzas centrífugas y gravitatorias.

Estas solicitaciones dependen de: diseño del bogie, (principalmente diámetro y tipo de rueda, carga por eje, valor de la masa no suspendida, características de la suspensión y de los sistemas de frenado y guiado), condiciones de utilización (velocidad, carga y naturaleza de los trenes) y condiciones de acoplamiento rueda-carril (perfiles de la rueda y del carril).

El aumento de las velocidades de los trenes a llevado consigo un aumento de las fuerzas dinámicas, incrementándose los pares de aceleración y frenado.

Todas estas solicitaciones pueden verse agravadas por los defectos de fabricación, ovalización, diferencias de diámetro entre ruedas de un mismo eje, etc.

El coste de mantenimiento de las ruedas supone un alto porcentaje del mantenimiento total de un tren, por lo tanto hay que intentar disminuir este coste mediante la reducción de las cargas dinámicas que soportan las ruedas, evitando así el deterioro y fractura de los componentes el vehículo y la vía, reduciendo las vibraciones y el ruido.

TEMA 5. DEFECTOLOGÍA EN RUEDAS FERROVIARIAS

5.1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que la fatiga es considerada el principal y más peligroso fenómeno de daño en las ruedas ferroviarias, efectos térmicos, deformaciones plásticas y desgastes también deben ser tenidos en cuenta, pues provocan la disminución de vida en servicio de las ruedas ferroviarias. Todos estos fallos pueden conducir incluso en ocasiones, aunque no es habitual, a descarrilamientos con el nivel de peligrosidad que ello conlleva.

Por lo tanto es necesario conocer en profundidad el tipo de defectos que se producen en la ruedas, sus causas y cómo podemos realizar mantenimientos preventivos que detecten estos fallos antes de provocar situaciones inseguras.

5.2. DEFECTOS EN LA BANDA DE RODADURA

5.2.1. DESGASTE

Es la pérdida de material debida al rozamiento con el carril. “*Hollow Wear*”(HW) es el término dado al desgaste existente en el centro de la banda de rodadura. Si el desgaste es muy significativo aparece la llamada falsa pestaña, produciendo una hendidura en el centro de la rueda. En este caso la dinámica y los límites de estabilidad del vehículo se ven afectados, sobretudo en puntos como cruces y desvíos, pues el contacto entre rueda y carril no es el óptimo. En ocasiones la aparición de la “falsa pestaña” puede producir daños en la cabeza del carril.

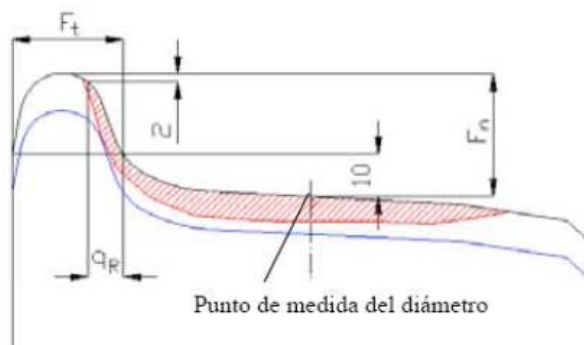


Figura 5.1. Hollow Wear.

El desgaste en la banda de rodadura es bastante lento, en torno a 1,5 - 3 mm cada 100.000 Km (Ravenet y Gauthier 1963). Como consecuencia del incremento de velocidades de los ferrocarriles ha habido un aumento del desgaste y de las tensiones existentes en las ruedas de ferrocarril.

La optimización en la lubricación y el uso de aceros más resistentes ha ocasionado una disminución del desgaste de la rueda pero a costa de una mayor fatiga de contacto a rodadura.

5.2.2. DEFECTOS POR FATIGA DE CONTACTO (RCF).

Rolling Contact Fatigue es el término dado al daño relativo a fatiga, como consecuencia de las fuerzas verticales de contacto entre rueda-carril, y de una fuerza de arrastre resultante, actuando en el mismo área de la rueda.

Los ciclos repetidos de carga y descarga sobre la banda de rodadura de la rueda junto con las fuerzas de deslizamiento adicionales, conducen a través del proceso conocido como “ratcheting” a una deformación plástica del material.

Una vez se supera la ductilidad del material por el incremento de deformación plástica, las fisuras empiezan a iniciarse y propagarse al estar sometidas a ciclos de carga repetidos en el material, en dirección paralela al plano de deformación del material. Una vez las fisuras han alcanzado cierto tamaño, también empiezan a propagarse por la presión hidrostática aplicada por algunos fluidos que entran en las fisuras desde la banda de rodadura o desde la cabeza del carril y quedan atrapados por la rotación de la rueda sobre el carril.

En ciertas ocasiones las redes de fisuras se pueden haber desarrollado lo suficiente para que ocurra el fenómeno llamado “shelling”. Término utilizado para el proceso de pérdida de material desde la banda de rodadura, siguiente al establecimiento de una red de fisuras por fatiga.

Como las fisuras se propagan además dentro de la banda de rodadura su alineación cambiara lentamente desde su ángulo tangencial inicial y empezará a adoptar una alineación más radial.

Debido a la diferencia longitudinal y a las fuerzas laterales presentes en varias zonas de la banda de rodadura, se puede hacer una clasificación del RCF según la zona.

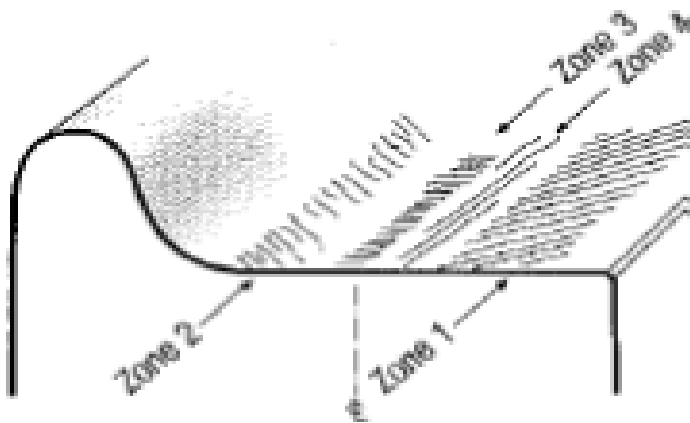


Figura 5.2. Localizaciones relativas a la zona de la rueda para RCF.

Debido a la reacción igual y opuesta de las presiones de contacto y las fuerzas de deslizamiento involucradas, el daño por RCF afecta tanto a ruedas como a carril. Sin embargo debido a la diferencia de orientaciones y de magnitudes de fuerzas resultantes, los efectos varían.

Por ejemplo cuando aparece en RCF clásico por el paso por curva, las esquinas de la parte superior de los carriles y en general los perfiles son afectados, además de las ruedas por este tipo de daño. El proceso de creación de este tipo de daño, que se conoce como “Head Checks”, es referido a un Modo 0 RCF. Mientras para el eje montado será la rueda interior del eje, la que probablemente estará más afectada por el Modo RCF1.

Típicamente los carriles son más sensibles a los efectos relativos a las fuerzas de tracción, mientras las ruedas son afectadas con más frecuencia por las fuerzas relativas a frenadas.

RCF EN ZONA 1.

La acción repetida de las fuerzas de deslizamiento longitudinales y laterales inducidas por el paso por curva pueden dar origen a la variante clásica de RCF en la zona 1 de la banda de rodadura, produciéndose mayormente en la parte exterior de la rueda que circula por la parte interna de la curva. Las diferentes relaciones entre las fuerzas de deslizamiento longitudinales y las fuerzas de deslizamiento laterales, influenciarán el ángulo de la red de fisuras, el cual típicamente está entre 30° – 45° sobre el eje de la rueda.

RCF EN ZONA 2.

Este daño es causado por los mismos mecanismos y fuerzas que intervienen en el RCF de la zona 1 excepto que ocurre por la interacción de la rueda en su parte más cercana a la pestaña con el carril exterior de la curva, el cual está más elevado que el interior debido al peralte existente en la curva.

El RCF en la zona 2 ocurre con mucha menos frecuencia que en la zona 1. Debido a los cambios en geometría y presión de contacto en la banda de rodadura mientras la rueda está en servicio, las fisuras por RCF en la zona 2 “desaparecen” debido al desgaste sufrido excepto que se hayan establecido dichas fisuras permanentemente. Las fisuras en la zona 2 adoptan típicamente un ángulo de 30° – 60° sobre el eje de la rueda.

RCF EN ZONA 3.

El crecimiento de fisuras por fatiga en el centro de la banda de rodadura es un fenómeno poco frecuente que ocurre por la aplicación repetida de elevadas fuerzas longitudinales de tracción que dan origen a deslizamiento longitudinal. Por ejemplo para vehículos que sufran repetidamente casos de niveles elevados de deslizamiento de ruedas o incluso rodadura pura cuando se aplica tracción para bajas velocidades, pueden empezar a exhibir tal daño por fatiga.

Debido a la componente longitudinal pura de las fuerzas de deslizamiento involucradas, las fisuras orientan lateralmente a través de la banda de rodadura de la rueda y adoptará un perfil con forma recta o en “C”. Hay que tener cuidado de no confundir estas fisuras por fatiga con su orientación lateral de 0° – 10° con el eje del vehículo, con las fisuras laterales por efecto térmico que son más críticas, asociadas con el sobrecalentamiento de la llanta en la banda de rodadura o por el bloqueo de frenos.

Una causa directa de la fuerza longitudinal que causa RCF en la zona 3 son los diferentes diámetros de rueda dentro de un bogie, especialmente cuando los ejes son acoplados mecánicamente y su instalación no es correcta dentro del bogie. Este hecho causa una fuerza deslizamiento longitudinal permanente aplicada de manera constante tangente a la vía. En este caso la alineación de la fisura puede adoptar un ángulo de orientación más amplio.

RCF EN ZONA 4.

Las fisuras pertenecientes a esta región tienen una orientación longitudinal significativa de unos 70° – 80° aproximada sobre el eje de la rueda, lo cual indica que están inducidas como consecuencia de una fuerza lateral resultante de deslizamiento. De manera similar a lo que ocurre con el RCF en la zona 2, por la rotación sufrida por el perfil de la rueda en servicio, a menudo se observarán algunas áreas con elevadas presiones de contacto locales o algunos efectos locales modificados en el perfil (debido al desgaste o a la deformación plástica). Por tanto estas fisuras de la zona 4 pueden “desaparecer” debido al desarrollo del perfil de la rueda en servicio.

Si los niveles de desgaste del perfil son suficientemente altos para cambiar constantemente la superficie de la banda de rodadura, entonces el fenómeno de RCF no se establecerá. De esta forma, el fenómeno de desgaste en el contacto rueda-carril puede verse como un fenómeno positivo. El llamado “Magic Wear Rate” es la tasa de desgaste necesaria para conseguir una superficie de contacto lo suficientemente renovada para evitar el establecimiento o propagación de una red de fisuras por RCF. En relación con esto hay que conseguir un balance entre desgaste y fatiga.

RCF CLUSTERS. CLUS.

En este tipo de daño el fenómeno de RCF tiene su efecto de daño localizado en la agrupación de fisuras existentes, pudiendo ocurrir en el centro de la banda de rodadura de la rueda. Estas agrupaciones a pesar de estar localizadas tienen un mecanismo de desarrollo similar al de RCF convencional.

Una vez creadas, tal agrupación de fisuras se propaga de manera significativa y conducen a un desprendimiento localizado en la banda de rodadura. Esto puede convertirse en un peligro incluso después de un kilometraje limitado, desde dicho desprendimiento. La agrupación de fisuras RCF está también asociada a la deformación plástica del material y a fenómenos de “ratcheting” en común con RCF convencional. Al principio el crecimiento de fisura tiene un ángulo de inclinación sobre la banda de rodadura, tendiendo a una dirección más radial, profundizando sobre dicha superficie. Debido a la aparición de deformación plástica local por las crecientes fuerzas laterales de deslizamiento, se observa que, a veces, el desarrollo de una agrupación de fisuras por RCF, puede haber sido precedido por un desgaste severo en la banda de rodadura localizado.



Figura 5.3. Cavity formada por el desprendimiento de un RCF cluster.

Debido a la propagación en profundidad de las agrupaciones de fisuras RCF cluster, el tamaño de la zona afectada puede aparecer más extenso durante los reperfilados.

5.2.3. FATIGA SUPERFICIAL

Las fisuras superficiales son grietas que se forman en la superficie de rodadura causadas tanto por el deslizamiento de la rueda, como por la acumulación de deformación plástica en la superficie de la banda. Estas grietas se propagan desde la superficie hacia el interior de la llanta, llegando a producir pequeños desprendimientos de material.

PLANOS

El deslizamiento puede llegar a producir un plano en la superficie de la rueda. Hay varias razones por las que se pueden producir deslizamientos, desde frenos en mal estado, heladas, fuerzas de frenado demasiado altas, contaminación del carril con arena, nieve, hojas...

Todos los planos eventualmente conducen a defectos como “*Spalling*”, y reducen la vida en servicio de componentes del bogie como los rodamientos. Las fuerzas de los impactos producidas por los planos son perjudiciales para los raíles y los componentes del bogie, además de generar vibraciones indeseables para los pasajeros.

Una idea equivocada y muy común, es que el daño por los planos de rueda se ocasiona por la acción abrasiva de la rueda, debido al deslizamiento de esta sobre el carril. Sin embargo es el daño térmico resultante de la entrada significativa de calor por el deslizamiento, el que causa el mayor daño.

Por el deslizamiento de la rueda sobre el carril, la fricción resultante calienta localmente el área de contacto pudiendo alcanzar los 800-850°C, transformando el acero perlítico en austenita. Como la parte de contacto de la rueda se enfría rápidamente después de que el deslizamiento ha cesado, especialmente después de que la rueda vuelve a girar de nuevo y entra en contacto con la cabeza fría del carril, la austenita se transforma en martensita, debido a este enfriamiento rápido. La martensita es una forma muy dura y frágil de apariencia plateada.

Debido a la aplicación de cargas cíclicas en el área de contacto se desarrollan fisuras en la zona afectada por el calor. Estas fisuras se propagan hasta que empiezan a producirse desprendimientos que originan cavidades.

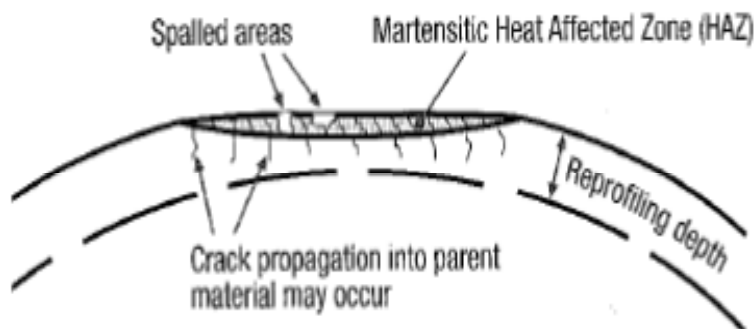


Figura 5.4. Representación esquemática de la sección de un plano de rueda.

SPALLING (Excoriación)

Tiene lugar cuando partes del material de la superficie de rodadura se desprenden en varios lugares más o menos de forma continua a lo largo de la circunferencia.

Se puede atribuir a una combinación de uno o más de los siguientes factores: vías en malas condiciones y una velocidad excesiva tienen como resultado grandes tensiones por impactos, cargas verticales excesivas, frenadas excesivas o uso de ruedas de dureza insuficiente.



Figura 5.5. Excoriación de una rueda (Spalling).

RATCHETING

La acumulación de la deformación plástica en la superficie de la banda de rodadura es otra de las causas que producen la aparición de grietas superficiales.

Si se supera el límite elástico del material aparecen deformaciones plásticas que dan origen a la aparición de grietas en sentido perpendicular a la dirección de la deformación. Inicialmente las grietas se propagan con un ángulo poco profundo y luego suelen desviarse en una dirección circunferencial.

La profundidad a la cual se propaga la grieta en dirección circunferencial dependerá del valor y características de la carga aplicada. Típicamente se desarrolla a profundidades de entre 1,5-2 mm pero pueden llegar a los 4 o 5 mm. Tras el desarrollo circunferencial de la grieta se produce la rotura final cuando una parte de ésta alcanza la superficie, desprendiendo una parte de la banda de rodadura.

5.2.4 FATIGA SUBSUPERFICIAL

Este tipo de fisuras se producen por debajo de la superficie de rodadura progresando hacia el exterior, donde pueden provocar la fractura y pérdida de material marcado por la ramificación de las grietas.

Normalmente se inician por defectos macroscópicos del material, pero también pueden producirse en puntos libres de defectos. Pueden ser originadas por fuertes cargas de impacto (como planos), pero normalmente son debidas a defectos en la rueda, durante la fabricación o por daños externos.

SHELLING (Exfoliación)

Este fenómeno está asociado a altas cargas y bajos niveles de deslizamiento y es uno de los defectos de ruedas más comunes.

Durante el ciclo de cargas el daño subsuperficial se acumula dando lugar a pequeñas grietas horizontales, estas se propagan bajo la superficie hasta que el campo de tensiones haga que cambie de dirección hacia la superficie.

El “*Shelling*” se caracteriza por tener forma de anillo, predominantemente paralelo a la superficie de rodadura. El crecimiento de la grieta se produce a una profundidad inicial próxima a los 4 o 5 mm propagándose hasta una profundidad de unos 20 mm, desviándose luego en una grieta circunferencial, observándose grietas entre los 15 y 300 mm antes de la rotura del material.



Figura 5.6. Shelling.

5.2.5. GRIETAS PROFUNDAS

Su origen se sitúa típicamente a más de 10 mm de profundidad, y se deben principalmente a defectos del material. Los esfuerzos de fatiga hacen que estas fisuras se propaguen hacia el interior o el exterior donde se vuelven más peligrosas.

Estas grietas requieren una mayor atención y deben ser detectadas a tiempo para evitar graves daños (descarrilamientos). Este tipo de defecto afecta a ruedas viejas, debido a que tienen una calidad metalúrgica más variable, aunque también aparecen en ruedas relativamente nuevas.

SHATTERING

Este daño provoca la pérdida de materia de la llanta y de la pestaña, normalmente debido a inclusiones internas situadas en la zona de contacto sometidas a grandes tensiones.

Las grietas de “Shattering” se han iniciado históricamente en huecos o porosidades de ruedas fundidas y en inclusiones de óxido de aluminio de ruedas forjadas.

Con el incremento de las velocidades de los trenes en Europa se ha producido una mejora destacable de la calidad de los aceros usados para las ruedas, disminuyendo así este tipo de defectos. También se han incorporado muchos sistemas de inspección no destructiva (END), que se usan después de los tratamientos térmicos y los mecanizados.

Las grietas más peligrosas son aquellas que se producen en el interior de la llanta. La profundidad de inicio de estas fisuras depende de las características del material, variando dependiendo de los autores que consultes, pero están siempre alrededor de los 10 y 20 mm. Estos defectos se propagan paralelos a la banda de rodadura hacia el exterior de la misma, antes de propagarse hacia el interior de la rueda.

La superficie de fractura tiene forma de concha, debido a que las grietas a esa profundidad tienen una componente a cortadura y cuando la dirección de rodadura es opuesta, estas grietas crecen en una dirección diferente creando crestas y valles. En el centro de la concha se encuentra el punto de iniciación de la grieta, que puede ser un poro o una inclusión no metálica. El fallo final debido al desprendimiento de la grieta circunferencial se produce con una longitud de entre 25 y 135 mm según Ekberg y cols (2001), entre 200 y 250 mm según Demilly (2003) ó entre 100 y 500 mm según Demilly y cols (2003).



Figura 5.7. Típica grieta Shattering (Stone y cols. 2001).

Según Lunden en Suecia (1992) y Marais en Sudáfrica (1998) el tamaño mínimo de defecto depende de las condiciones de explotación, pero defectos tan pequeños como 1 mm pueden iniciar defectos de tipo “Shattering”. Baretta y cols (2001) aseguran que el tamaño crítico de defectos está entre 1 y 5 mm de longitud y entre 0,3 y 1 mm de ancho.

El área de interés de este tipo de defectos suele ser una banda comprendida que va desde la cara externa de la rueda hasta 60-70 mm de longitud y un espesor de 40 mm aproximadamente.

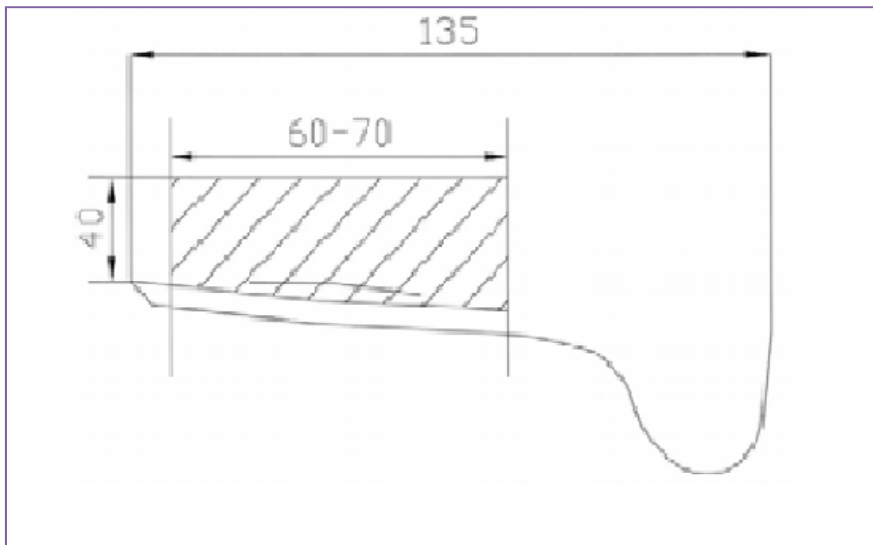


Figura 5.8. Zona de localización de grietas circunferenciales en la llanta (mm).

En la Figura 8 podemos ver claramente la forma de concha de la superficie de fractura con algunos picos y valles, y como el punto de iniciación se encuentra en el centro de la concha.

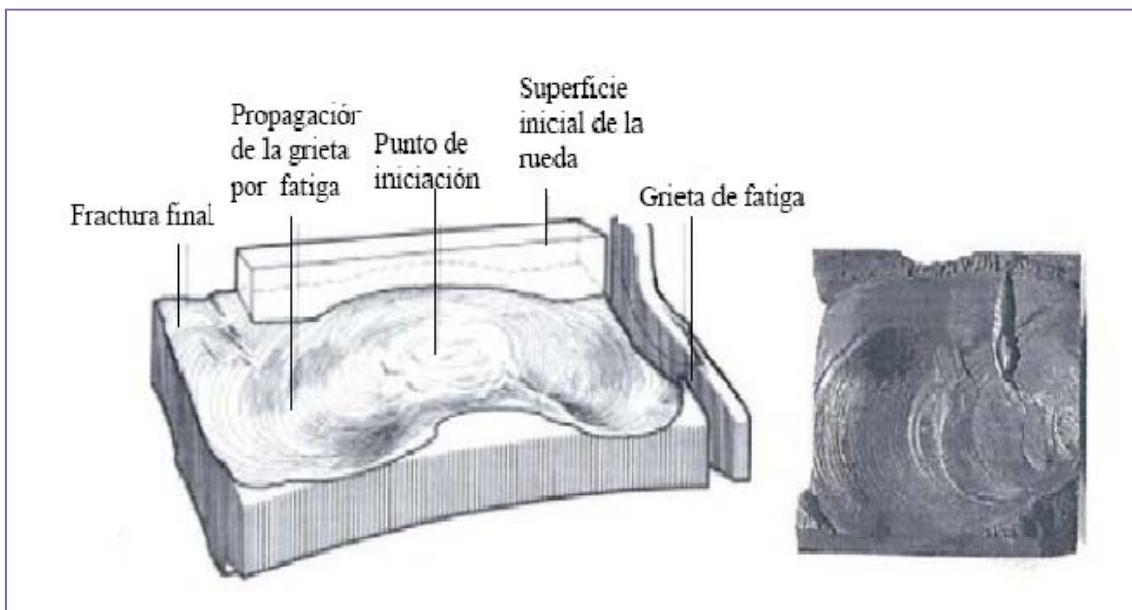


Figura 5.9. Crecimiento de grieta por Shattering.

Aunque es menos frecuente, y si el campo de tensiones residuales es propicio, también puede haber un crecimiento axial de la grieta. En la **Figura 9** podemos ver una grieta surgida a partir de defectos internos en la llanta y que se ha propagado por fatiga por el interior de la llanta, siguiendo una dirección axial hasta producir la rotura final de la rueda.

El aumento de las cargas de los trenes ha aumentado la frecuencia de este tipo de defectos. Este tipo de defecto suele originarse en un defecto “Shelling” ó “Spalling” en la banda de rodadura. La grieta de fatiga se propaga hacia abajo en la sección de la llanta a un ángulo, entonces por alguna razón (probablemente por el impacto de rueda en servicio) el plano de la grieta gira paralelo a la cara frontal o trasera y se mueve rápidamente a lo largo de la cara de la llanta.

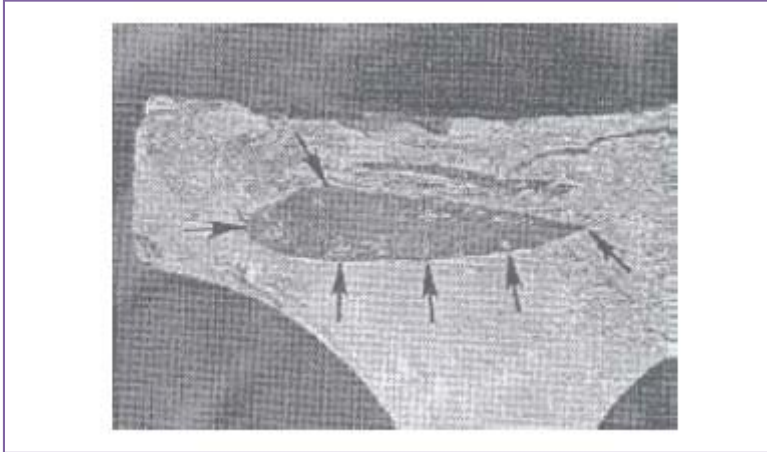


Figura 5.10. Grieta interna en la llanta de una rueda (Hackenberger y Lonsdale, 1998).

5.2.6. GRIETAS TÉRMICAS

Son fisuras que suelen situarse en el borde exterior de rodadura y progresan hacia el interior de la llanta que, bajo pequeños desarrollos, pueden provocar la rotura frágil de la llanta.

La formación de grietas térmicas tiene su origen en diferencias de temperaturas entre el velo y la llanta, especialmente tras operaciones de frenado con zapatas. Se calienta bruscamente la llanta mientras que el cubo y el velo permanecen a temperaturas más bajas con lo que se generan unas tensiones en la rueda que pueden desembocar en la formación de grietas.

Las fisuras pueden propagarse lateral y radialmente a través de la llanta y hacia el velo de la rueda. En casos extremos puede producirse el fallo catastrófico por la aplicación de cargas mecánicas y térmicas posteriores al inicio de la fisura.



Figura 5.11. Grieta Térmica.

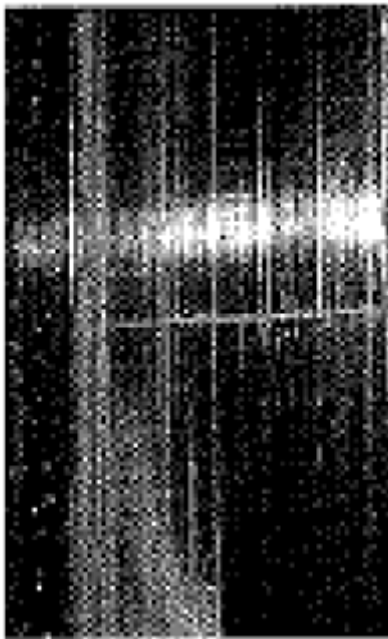


Figura 5.12. Grieta Térmica Lateral.

Otra posibilidad es que estas grietas térmicas que han comenzado en la superficie como grietas axiales se desvíen bajo la influencia de cargas mecánicas en grietas circunferenciales.

La posición típica de este defecto es la que se muestra en la **Figura 11**. De las dos posiciones indicadas la más peligrosa es la posición de la esquina, ya que puede producir que la rueda se abra.

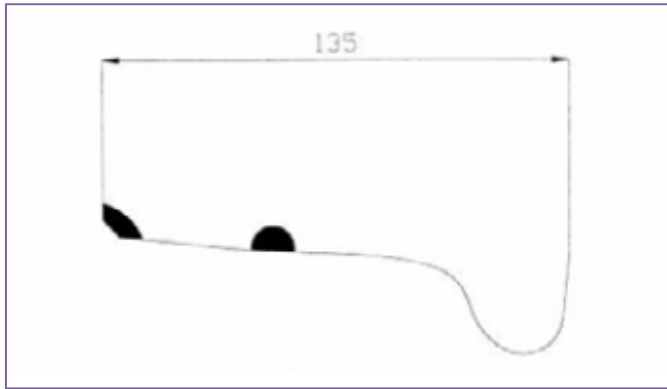


Figura 5.13. Posición Típica de Inicio de Grieta Térmica.

5.2.7. SOBRECARGA TÉRMICA.

En aquellos vehículos que usan la banda de rodadura para frenar se produce una transferencia de calor desde la llanta hacia el interior de la rueda, que no es despreciable y es debida a la transformación de energía cinética en térmica. Algunas acciones como frenadas prolongadas, arrastre de zapatas, afectan a la integridad de la banda de rodadura, pudiendo calentarse más allá de su capacidad térmica para la que fue diseñada.

Los efectos más notables de estas sobrecargas térmicas son la decoloración de la pintura de la llanta y a la del acero de la rueda en la banda de rodadura. Las consecuencias son el cambio de signo de las tensiones residuales de compresión existentes en la llanta a la vez que puede ocasionar fisuras laterales en la banda de rodadura si las temperaturas y la duración de las mismas son demasiado elevadas.

5.2.8. DEFORMACIÓN LATERAL DE LA BANDA DE RODADURA.

Este tipo de daño por deformación lateral, causa un labio desarrollado sobre la parte del chaflán en la banda de rodadura de la rueda.

Normalmente este tipo de daños son sufridos en locomotoras más que otro tipo de vehículos. Esto es porque al tener grandes ejes cargados, generalmente aplican fuerzas muy elevadas de tracción mientras circulan por curvas cerradas.

La deformación lateral admisible suele establecerse en el manual de mantenimiento del vehículo. En ocasiones se pueden producir ahondamientos y el chaflán puede desplazarse lateralmente debido a dicha deformación.

5.2.9. COLAPSO LOCAL DE LA BANDA DE RODADURA.

Este fenómeno puede llevar a deformaciones laterales y a pérdidas de circularidad en las ruedas. Se producen disminuciones en las medidas del radio de la rueda que incluso pueden llegar al milímetro. Para su detección se usan sensores de carga situados en las ruedas, que reflejan sobrecargas verticales transmitidas a las vías.

Este fenómeno tiene en común con el RCF que aparece solo en ruedas individuales y puede ocurrir en ausencia de martensita u otros tipos de daño térmico. Tras el daño por deformación plástica lateral, la red de fisuras puede entonces desarrollarse hacia el centro de la banda de rodadura, lo que puede conducir a desprendimientos de material y a la formación de cavidades locales en la rueda.

5.2.10 MARCAS EN LA BANDA DE RODADURA.

En general las marcas y hendiduras que aparecen en la banda de rodadura de la rueda son ocasionadas por cuerpos extraños situados en el carril. A veces se sabe que estos cuerpos extraños han sido colocados deliberadamente para provocar daños, aunque no es lo habitual. Aunque mayoritariamente estos daños solo afectan a la apariencia de la rueda, hay que tener en cuenta que se puede superar los límites expuesto en el manual de mantenimiento por lo que se deberá hacer un reperfilado de la rueda.

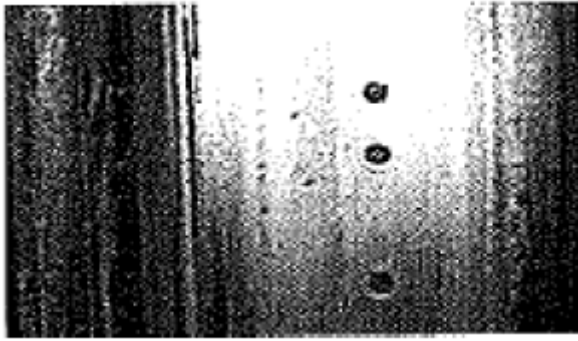


Figura 5.14. Marcas en la banda por cuerpos extraños.

Las partículas de arena de los sistemas para mejorar la tracción o el frenado pueden generar estas marcas, que serán proporcionales al tamaño de grano de la arena utilizada. A veces el efecto de estas marcas tiene una apariencia de “cielo estrellado”.

5.2.11. RUEDAS ESCAMADAS.

Este fenómeno se produce por la adherencia de material en la superficie de rodadura de la rueda. Se produce debido a que los frenos causan que la rueda deslice sobre el carril, elevando la temperatura de éste hasta el punto de producir un flujo de material desde el carril a la banda. Suele mezclarse con suciedad procedente de frenos y otros materiales. Al enfriarse forma capas parecidas a escamas. Si el defecto se observa en ruta existen varias maniobras para llegar al destino:

Escamas de 1 – 5 mm: 25km/h como máximo.

Escamas de 5 – 10 mm: 15km/h máximo.

Escamas de 10 – 20 mm: 5km/h máximo.



Figura 5.15. Rueda Escamada.

5.3. DEFECTOS EN LA PESTAÑA.

5.3.1. DEFORMACIÓN DE LA PUNTA DE LA PESTAÑA.

Este daño predomina en tranvías y vehículos ferroviarios ligeros que circulan con el extremo de la pestaña en el interior de raíles acanalados.

Irregularidades en los perfiles y cuerpos extraños junto con los raíles acanalados, pueden dar origen al incremento de las presiones de contacto localizadas en el extremo de la pestaña, que causan deformación plástica en dicha pestaña. Se pueden desarrollar por las repetidas cargas o por choques del extremo de la pestaña.

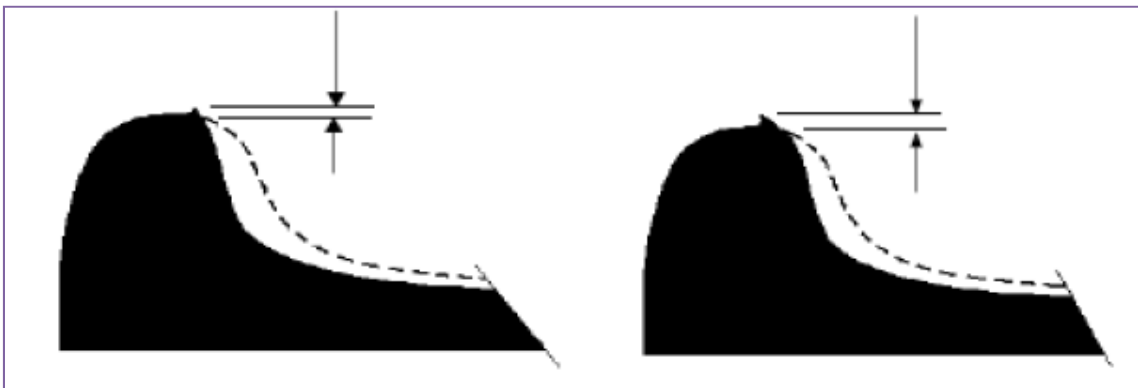


Figura 5.16. Deformación en la Punta de la Pestaña.

5.3.2. PESTAÑAS EMPINADAS.

Se dice que una pestaña está empinada cuando su cara interior forma un ángulo con la vertical de 5° o menos.

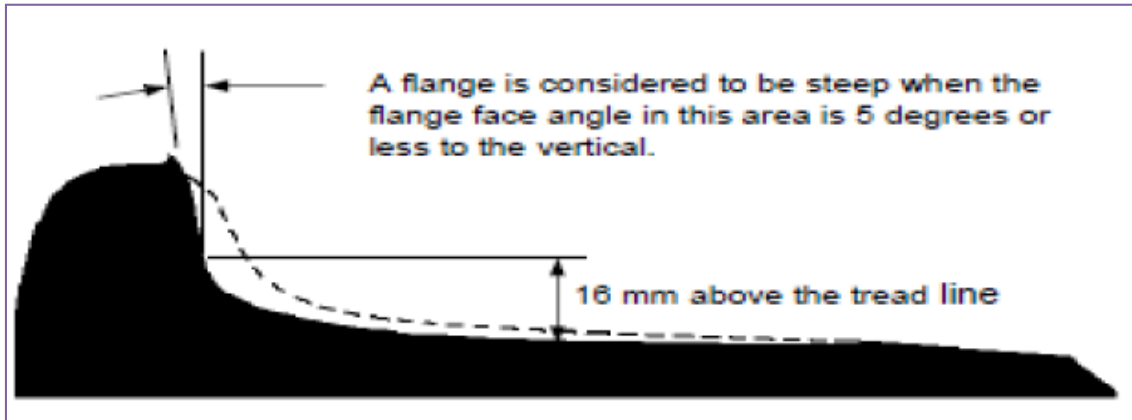


Figura 5.17. Pestaña Empinada.

5.3.3. PESTAÑAS ELEVADAS.

Se considera pestaña elevada, a la pestaña de una rueda, cuando excede los 35 mm de alto, como vemos en la **Figura 5.18**. Una rueda con una pestaña elevada no puede ser puesta en servicio, además de que el operador debe realizar un detallado informe de inspección y programar su mecanizado al cabo de 15 días de su detección.

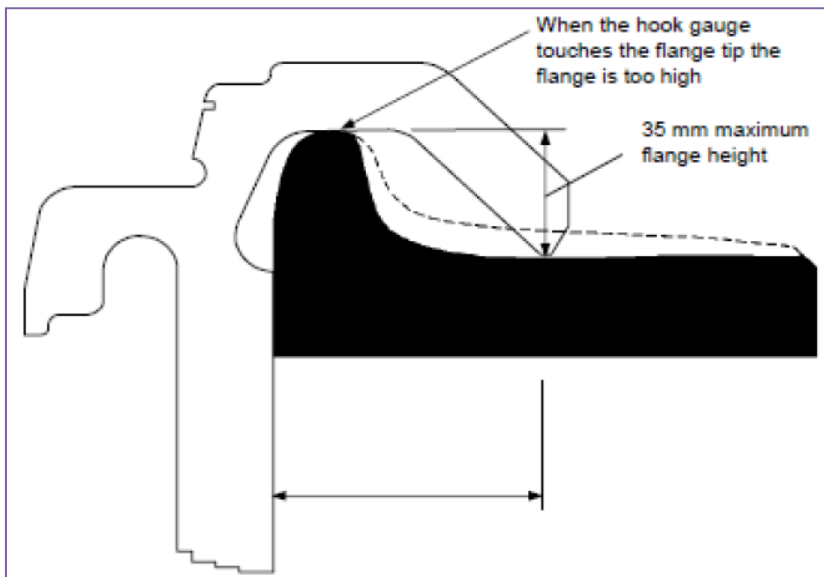


Figura 5.18. Pestaña Elevada.

5.3.4. PESTAÑA FINA.

Según va avanzando el desgaste, el espesor de las pestañas va disminuyendo pudiendo llegar a tener pestañas muy finas. El mínimo espesor de una pestaña es de 19 mm. Se utilizan calibre para poder determinar este defecto. Cuando el extremo del medidor toque con la banda de rodadura de la rueda se considerará pestaña fina.

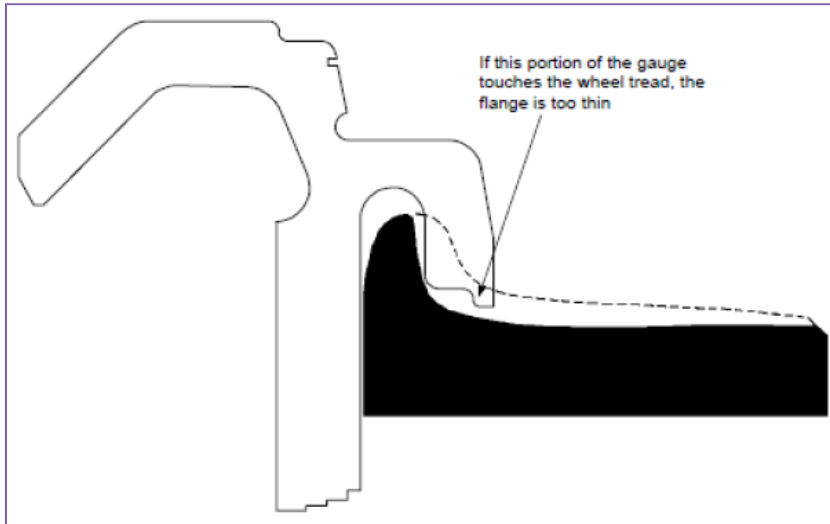


Figura 5.19. Pestaña Fina.

5.3.5. PESTAÑAS PEQUEÑAS.

En ocasiones se produce un avance muy rápido del desgaste de la pestaña, sin haber un significativo desgaste de la banda de rodadura, por lo que se crea una rampa en la base de la pestaña reduciéndose bastante el tamaño de la pestaña. La creación de esta rampa hace que la rueda trabaje más cerca de la parte superior de la pestaña pudiendo llegar al descarrilamiento.

Para determinar este defecto también se usa un calibre, el cual posee varios puntos de contacto, los cuales estarán apoyados en el perfil de la rueda. Si no existe una separación entre el calibre y la cumbre de la pestaña, entonces tenemos una “pestaña pequeña”.

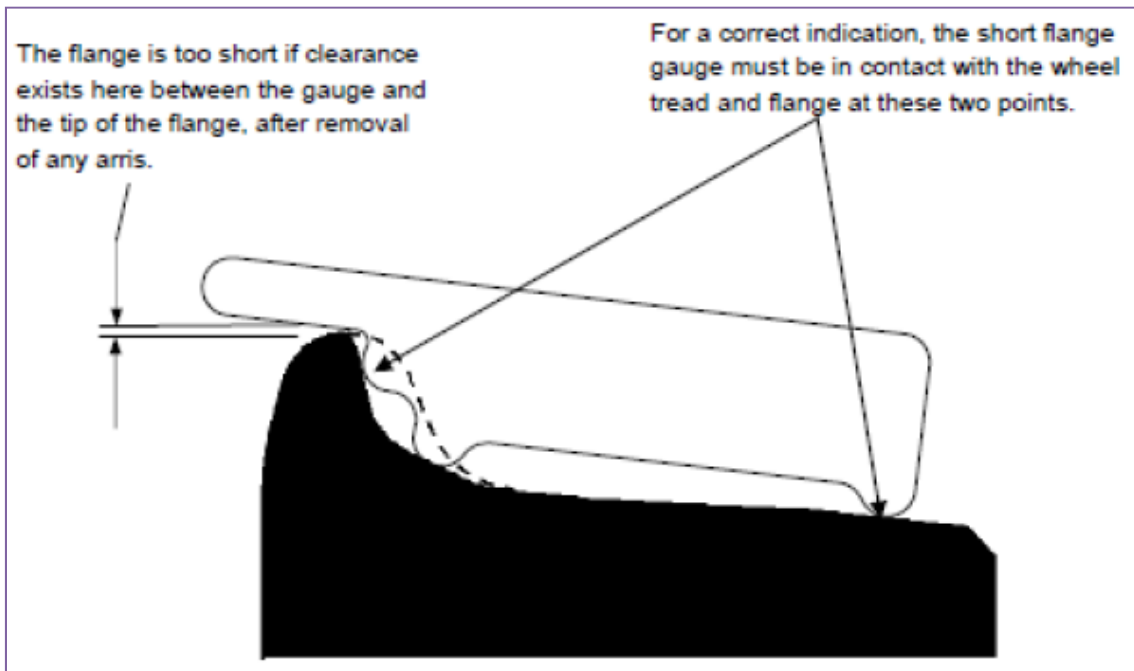


Figura 5.20. Pestaña Pequeña.

5.3.6. DESPRENDIMIENTOS EN LA PESTAÑA.

Típicamente se origina por la existencia de una elevada presión de contacto de la pestaña con el carril, el cual tiene una parte cortante que interacciona con la pestaña. En principio esta parte cortante del carril debe estar a una altura que garantice la no interacción con la pestaña, pero por posibles desgastes tanto en la rueda como en la cabeza del carril, la parte cortante se aproxima a la pestaña. También se forma tras circular con la punta de la pestaña por vías acanaladas.

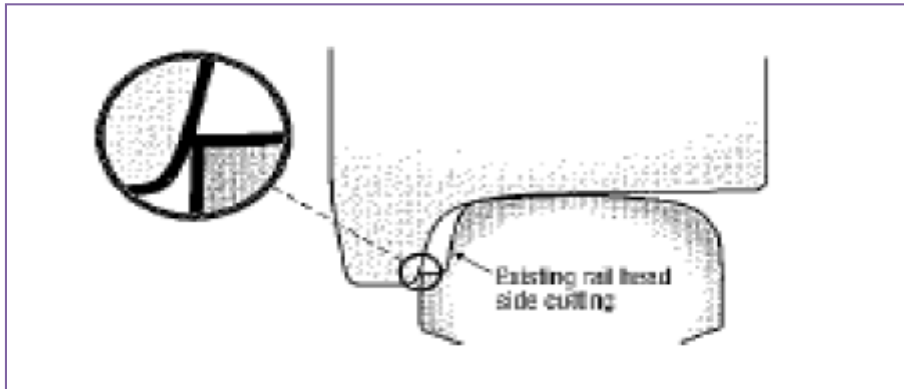


Figura 5.21. Parte Afilada del Carril.

El reperfilado de la banda de la rueda restaura las condiciones de la pestaña aunque se deben tomar medidas adicionales para evitar que se repita.

5.3.7. GRIETAS EN LA PESTAÑA

Se trata de fisuras de progresión axial que pueden afectar a una o varias zonas de la pestaña, y su origen puede ser térmico o mecánico. El origen térmico viene de una fricción severa de la zapata sobre la pestaña. En el caso del origen mecánico, las grietas se producen por presiones anormales entre pestaña y carril, debido a trazados de vías deficientes con curvas abundantes y/o excesivamente abundantes.

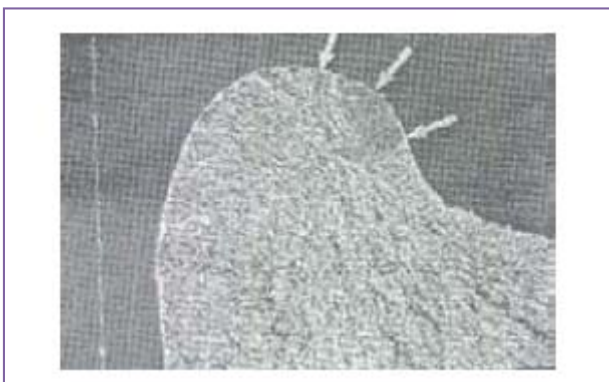


Figura 5.22. Fisura en la Pestaña.

5.4. DEFECTOS EN EL VELO

Se trata de fisuras circunferenciales que, partiendo de una zona defectuosa, se desarrollan por fatiga. Este tipo de fisuras pueden afectar a todo el espesor del velo y alcanzar grandes desarrollos circunferenciales, hasta producir la rotura brusca de la rueda.

Se pueden deber a defectos metalúrgicos, pliegues de forja o laminación, capaces de generar fisuras bajo los grandes esfuerzos alternativos a los que se ve sometido el velo. También se podría producir por entallas de mecanizado o por un incorrecto diseño (partes delgadas, taladros de equilibrado, radios de acuerdo cerrados, zonas de rugosidad elevada). El inicio de la fisura se debe a defectos superficiales de fatiga como descarbonaciones, marcas de mecanizado, etc. Las fuerzas de servicio, en especial las producidas en las curvas, producen en el velo un fenómeno de fatiga

La zona de transición entre la llanta y el velo es una zona peligrosa, donde el momento de flexión alternado causa grietas de fatiga en el interior de la rueda. Las grietas en el velo se desarrollan circunferencialmente como se puede apreciar en la Figura 16.

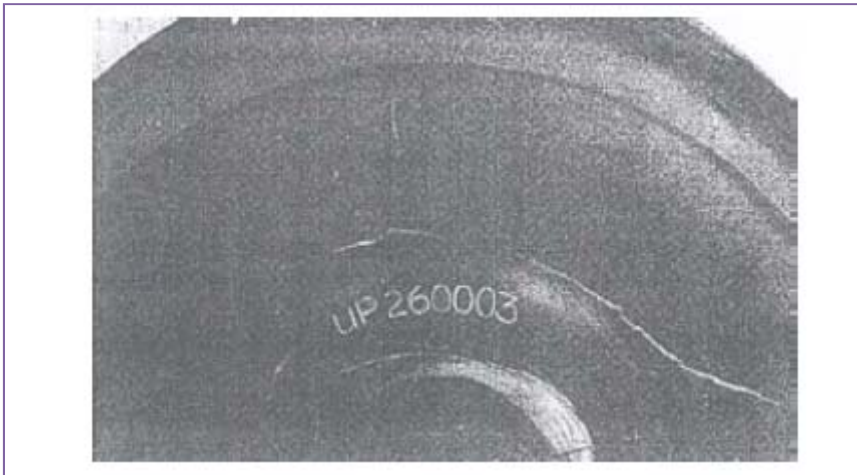


Figura 5.23. Grieta en el Velo.

RENFE ha decidido inspeccionar los velos de las ruedas motrices (ruedas con discos de freno atornillados a los velos) cada 40000 km. La inspección se realiza con un palpador a 0° de forma manual. La inspección se centra en la posible detección de fisuras en la periferia de los taladros realizados para el montaje de los discos de freno.

5.5. DEFECTOS EN EL CUBO.

Generalmente corresponde a fisuras de progresión axial producidas por defectos internos o aprietes excesivos durante la operación de calado. Este tipo de defectos no es muy común.

5.6. OVALIDAD DE LA RUEDA.

El desgaste irregular en ruedas y carriles, (*corrugación*), junto con la respuesta dinámica al impacto de un plano, son algunos de los aspectos más estudiados en la interacción dinámica del vehículo-carril. La forma ovalada o fuera de redondez (*out of round*, OOR) de una rueda genera severos impactos de carga sobre el carril que perjudican a rodamientos, infraestructura, etc. Las emisiones del ruido generado por el impacto afectan al confort de los pasajeros y disminuyen a la calidad del servicio prestado por las empresas ferroviarias. Por lo tanto el desgaste y la deformación de las ruedas tienen un coste significativo para las empresas, si no son reparadas o retiradas pronto del servicio. Podemos clasificar la forma de la OOR en:

Periódica: La deformación es regular y se produce de forma determinada. Por ejemplo una deformación de tercer orden tiende a transformar la circunferencia de la rueda en una forma triangular. Una de segundo orden tiende a formar un óvalo. La excentricidad o deformación de primer orden, puede ser causada por una desalineación del juego de ruedas durante el torneado.

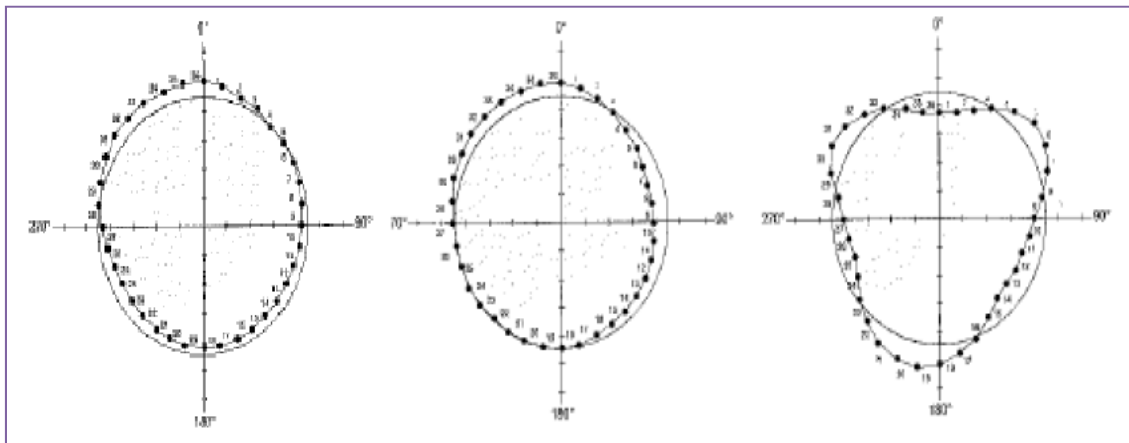


Figura 5.24. Deformación de Primer, Segundo y Tercer Orden respectivamente.

Estocástica: Cuando la deformación no se puede determinar, pues no tiene una forma definida, sino que es aleatorio decimos que es estocástica. Este fenómeno es causado a menudo por una microestructura bastante variada en el material de la baada de rodadura, es decir falta de homogeneidad. La formación de martensita y bainita en la llanta termina en exfoliaciones y/o pérdida de material debido al agrietamiento de la superficie por RCF. La variación del radio por la formación de microestructuras está entre 0,5 y 1 mm.

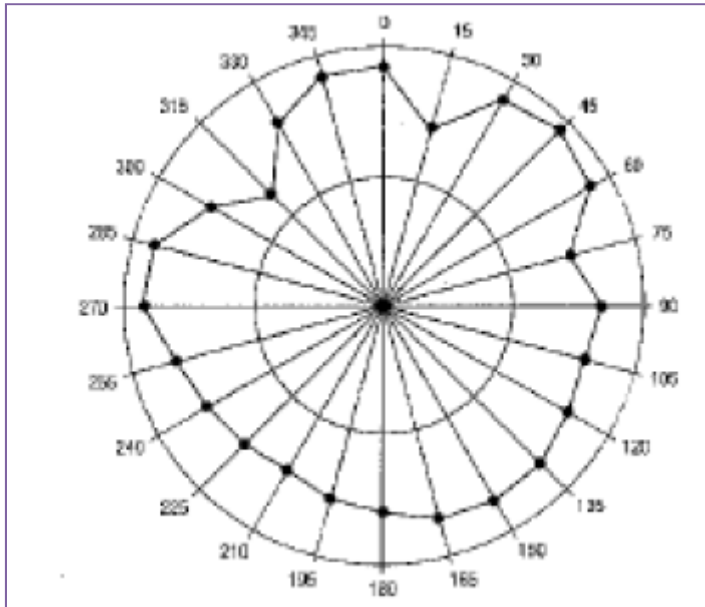


Figura 5.25. Perda de Circularidad Aleatoria.

Una forma de determinar la pérdida de circularidad de la rueda, aparte de técnicas automáticas, consiste en tomar una serie de medidas del radio alrededor de la circunferencia, sobre tres posiciones en la generatriz: la posición nominal de contacto “ncp”, y otras dos medidas a 10 mm de cada lado de esta posición. Para ello se usa un DTI, Dial Test Indicator, las irregularidades deberían ser medidas en al menos 24 puntos igualmente espaciados. Por lo general el punto nominal de contacto se encuentra a 70 mm desde la cara interior de la pestaña.

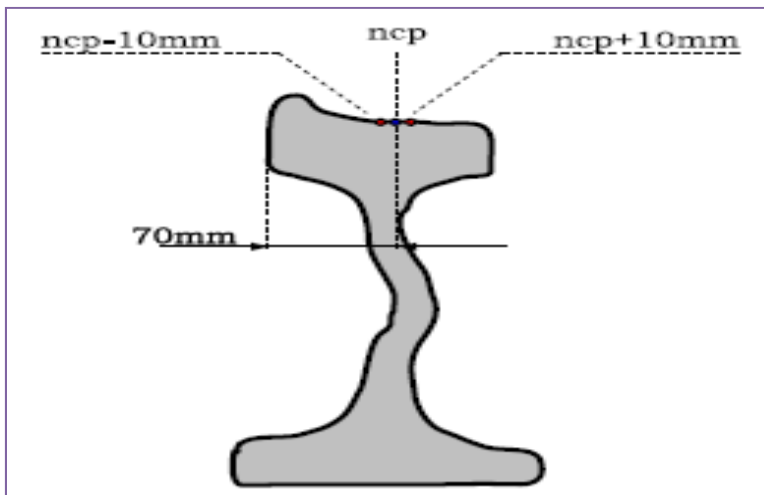


Figura 5.26. Posiciones Nominales del Punto de Contacto.

TEMA 6. MÉTODOS DE INSPECCIÓN EN RUEDAS FERROVIARIAS

6.1. INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que los materiales tienen defectos tanto a nivel macroscópico como microscópico. Partiendo de esta base podemos decir que los defectos existentes en los aceros de los materiales ferroviarios pueden ser de origen intrínseco al material, pueden aparecer durante los procesos de fabricación o durante la vida de servicio del material.

La fiabilidad de los materiales, o la vida a fatiga del mismo dependen de muchos factores entre los que encontramos el tamaño de fisura. Conocer el tamaño crítico de fisura no es sencillo, ni si quiera resulta fácil encontrar fisuras, es más el hecho de no encontrar fisuras en el material no implica que no las haya, simplemente que nuestro método o equipo no es capaz de encontrarlas, por ejemplo por falta de resolución.

Dentro del ámbito ferroviario son necesarias las inspecciones de los materiales, para garantizar la seguridad. Estas inspecciones deben ser realizadas mediante ensayos no destructivos (END). Se entiende por ensayo no destructivo a cualquier prueba o test practicado a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales, implicando un daño imperceptible o nulo de esta forma no se impide la utilización del material en el futuro.

Existen diversos métodos de inspección basados en ensayos no destructivos para las ruedas ferroviarias. En este capítulo haremos una exposición de los distintos métodos que se pueden utilizar en la inspección de ruedas ferroviarias.

6.1.1. TIPOS DE MANTENIMIENTO

- **Mantenimiento correctivo:** En un principio, el mantenimiento quedaba relegado a intervenciones como consecuencia de las averías y con los consiguientes costes de reparación (mano de obra, piezas de repuesto,...), así como los relativos a los costes por las paradas de producción. Este tipo de mantenimiento se conoce como mantenimiento correctivo.
- **Mantenimiento preventivo:** Las necesidades de mejora de los costes derivados de las bajas disponibilidades de la máquina y de las consiguientes paradas de producción llevaron a los técnicos de mantenimiento a programar revisiones periódicas con el objeto de mantener las máquinas en el mejor estado posible y reducir su probabilidad de fallo. Presenta la incertidumbre del coste que genera. ¿Hasta qué punto los períodos establecidos para las intervenciones de mantenimiento están sobredimensionadas? ¿Se pueden reducir los períodos de intervención sin consecuencias nefastas para las máquinas, abaratando de esta manera el coste del mantenimiento? Todas estas preguntas carecen de respuestas precisas y limitan la eficacia del mantenimiento.

- **Mantenimiento predictivo:** Como consecuencia de las incertidumbres que presenta el mantenimiento preventivo y con el apoyo del desarrollo tecnológico, se desarrolló un nuevo concepto de mantenimiento basado en la condición o estado de la máquina. Este tipo de intervención se conoce como mantenimiento predictivo, y viene a suponer toda una revolución dada su filosofía de anticipación a la avería por medio del conocimiento del comportamiento de la máquina y de cómo debería comportarse, conociendo de este modo previamente qué elemento puede fallar y cuándo. Así se puede programar una intervención sin afectar al proceso productivo, con las consiguientes optimizaciones en costes de producción, mano de obra y repuestos. Se evitan de este modo grandes y costosas averías agilizando las intervenciones.
- **Mantenimiento proactivo:** Se ha desarrollado como complemento a la evolución del mantenimiento predictivo. Este concepto engloba los tipos de mantenimiento detallados anteriormente elevándolos a otra dimensión; el análisis de causas. El mantenimiento predictivo puede determinar si algún elemento de la máquina puede fallar, pero no estudia la causa raíz del fallo. El mantenimiento predictivo no responde a la causa por la cual un rodamiento falla repetidamente aunque si nos indique cuando puede fallar. Para cubrir esta incertidumbre, el mantenimiento proactivo o también conocido como fiabilidad de máquina analiza la causa raíz de la repetitividad de la avería, resolviendo aspectos técnicos de las mismas.

Nosotros vamos a exponer los métodos predictivos que existen en el ámbito ferroviario, poniendo especial atención a aquellos que puedan ser más usados y actuales, ya que nuestro proyecto se enmarca dentro de los métodos predictivos.

6.2. MÉTODO DE INSPECCIÓN VISUAL

Es el método más sencillo y al que siempre se recurre cuando mediante otro método se obtiene una indicación de defecto o fallo. Este método de inspección es un complemento para cualquier otro método de inspección, siendo a veces un requisito inicial en algunos ensayos.

A través de este método podemos detectar defectos a nivel superficial como soldaduras y uniones defectuosas, componentes incompletos, ajustes defectuosos, grietas, mal acabado superficial, marcas, cavidades, desgaste, erosión, etc.

Los métodos de inspección visual pueden incluir equipos de iluminación (linternas halógenas, lámparas portátiles, etc.), equipos de visión (espejos articulados, lentes de aumento, microscopios, etc.) y equipos de medida (calibres, reglas, etc.).

Existen tres niveles de inspección en los que los operarios pueden estar certificados:

- Nivel I “Evaluaciones específicas para la aceptación o rechazo”.
- Nivel II “Ajustar y calibra los equipos e interpretar y evaluar los resultados”.
- Nivel III “Responsable de establecer técnicas y procedimientos”.

6.3. MÉTODO DE ANÁLISIS ACÚSTICO

Se trata de un método usado desde hace mucho tiempo. Se sabe que las ruedas cuando son golpeadas con un martillo suenan de forma diferente al tener fallo, que cuando estas libre de fallo. La rueda se deberá ser excitada de manera que vibre, analizando el sonido obtenido. La aparición de discontinuidades, como son las grietas, provoca distintos modos de vibración, y como consecuencia distintos sonidos.

Hay que hacer una distinción entre este método y los modernos métodos de estudio de vibraciones, ya que este caso aunque se están analizando las vibraciones, el objetivo del mismo es el estudio y análisis del sonido que emite la rueda.

6.4. MÉTODO DE ANÁLISIS DEL RUIDO DE BARKHAUSEN

Este método sirve para conocer el estado de tensiones de las ruedas. Se basa en el movimiento de los bordes de los dominios microscópicos magnéticos que ocurre en los materiales ferromagnéticos bajo la influencia de un campo magnético externo. Estos movimientos no uniformes se reflejan en el lazo de histéresis de magnetización como pequeños y discontinuos incrementos en la curva conocida como ruido de Barkhausen, además está fuertemente influida por el estado de tensiones del material. En el caso del acero, la intensidad del ruido se incrementa bajo la aplicación de tensiones tractivas y decrece al aplicar tensiones a compresión.

6.5. MÉTODO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Mediante este método se buscan grietas superficiales, o muy próximas a la superficie. El ensayo se basa en el principio de distorsión de un campo magnético alrededor de un defecto perpendicular a la dirección de dicho campo, conocido como fugas de flujo.

La presencia de esta reducción en la continuidad del campo magnético, que indica la presencia de un fallo o defecto en el material, será detectada por medio del uso de micropartículas ferrosas aplicadas sobre la superficie. Estas partículas se acumulan alrededor del área de la discontinuidad.

Mediante la observación de la acumulación de estas partículas ferrosas podemos definir la localización, forma, tamaño y extensión de la discontinuidad.

Podemos decir que las ventajas de este método son que es bastante sencillo, y su coste es bajo, es capaz de detectar defectos de 1 μm de ancho y es bastante rápido comparado con otros métodos.

Las limitaciones de este método son que las piezas deben ser ferromagnéticas para poder ser inspeccionadas, hay que realizar una desmagnetización después del ensayo y que cuando existen uniones con diferentes propiedades magnéticas, rugosidades, o cubiertas con superficies no magnéticas pueden aparecer falsos positivos, que indicarán un fallo cuando no lo hay.

Los ensayos con partículas magnéticas pueden ser realizados con partículas visibles o con partículas fluorescentes.

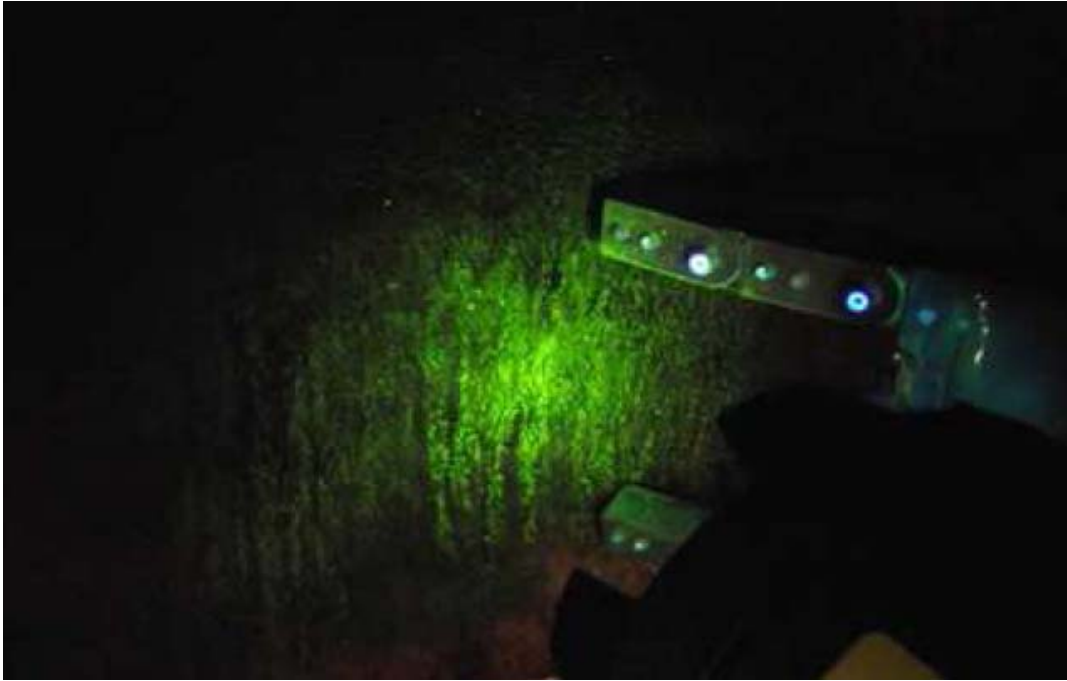


Figura 6.1. Inspección con Partículas Magnéticas Fluorescentes.

6.6. MÉTODO DE CORRIENTES DE EDDY (INDUCIDAS)

Se las conoce también como corrientes parásitas, se utilizan para inspeccionar materiales conductores buscando defectos superficiales, irregularidades en estructura y variaciones en composición. El método se basa en conectar una fuente de corriente alterna con una bobina, produciendo un campo magnético variable. Este campo se colocará cerca del material a inspeccionar, el cual debe ser capaz de conducir una corriente eléctrica, induciendo así las corrientes parásitas. Hay que decir que las propias corrientes parásitas inducirán un campo magnético propio.

Hay una unidad de medida que se encargará de medir el campo magnético y convertirá la señal en un voltaje que se podrá leer en un medidor o en un tubo de rayos catódicos.

Propiedades como la dureza, la composición en aleación, la pureza química, y la condición de tratamiento térmico influyen en el campo magnético y se pueden medir directamente con el uso de una sola bobina.

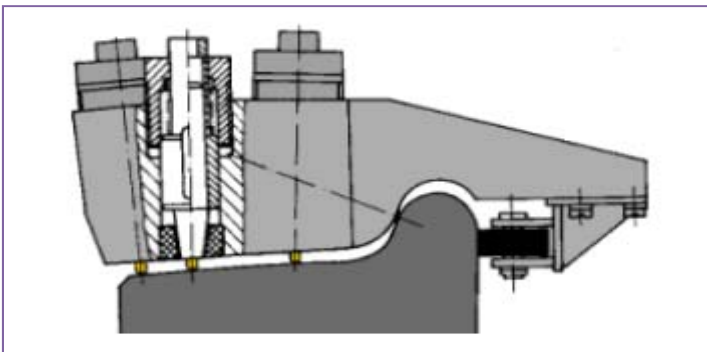


Figura 6.2. Posición de los Sensores de Corrientes Inducidas.

6.7. MÉTODO DE LÍQUIDOS PENETRANTES

Este método se usa para detectar discontinuidades en superficies sólidas o materiales esencialmente no porosos. Permite detectar fallos independientemente de la disposición y configuración de la pieza, o de la orientación de los defectos. Los líquidos penetrantes llegan hasta las discontinuidades superficiales por acción capilar. Por lo tanto este método es aplicable para detectar todo tipo de fallos superficiales como fisuras, porosidades, áreas encogidas, laminaciones, etc.

Hay una gran variedad de equipos de líquidos penetrantes, desde los más simples compuestos por botes de tinta y reveladores, hasta los más sofisticados con sistemas computerizados. El punto clave de este método es el establecimiento de procedimientos y estándares de control para la obtención de resultados fiables.

La limitación de este método es que solo es capaz de detectar defectos que están abiertos hasta el exterior y que las superficies irregulares, rugosas o porosas pueden producir problemas en la inspección. Los recubrimientos, cascarillas, y contaminaciones pueden ocultar defectos al ocupar estos los espacios de los defectos.

La inspección por líquidos penetrantes empieza con la preparación de la superficie a inspeccionar, dejando la superficie limpia sin contaminantes que alteren el ensayo. Luego se aplica el penetrante sobre la superficie dejándolo un tiempo para que penetre en la pieza. El siguiente paso consiste en eliminar el exceso de penetrante, bien sea simplemente con agua, con un emulsivo o con un disolvente dependiendo del penetrante. Luego se aplica el revelador el cual penetra hasta mezclarse con el líquido penetrante dándole contraste para que sea visible. Se realiza la inspección para determinar si existen defectos y por último se realiza una limpieza de la pieza para que quede tal como se encontraba al principio.

Clasificación del líquido según solubilidad:

- Penetrantes lavables con agua o autoemulsificables: Para limpiar y eliminar los excesos del penetrante se usa simplemente agua, con lo cual se abarata el coste.
- Penetrantes postemulsificables: Estos no son solubles en agua. Se utilizan emulsificadores para eliminar el exceso de penetrante, creándose una capa superficial que se puede remover posteriormente con agua. Hay dos tipos de emulsificadores, “hidrófilos” (se usan en solución de agua, en una saturación determinada por las necesidades de cada caso) y “lipofílicos” (de base aceite, que se usan según vienen entregados por el fabricante).
- Penetrante eliminables con disolvente: Para su eliminación se usa un disolvente no acuoso, denominado “eliminador”. Son muy prácticos ya que generalmente el disolvente se presenta en aerosol.

Clasificación del líquido según el color:

- Penetrantes coloreados: Simplemente se necesita una fuente de luz blanca para inspeccionar la pieza a simple vista.



Figura 6.3. Inspección con penetrante visible.

- Penetrante fluorescente: Se inspecciona con una lámpara de luz ultravioleta, “luz negra”, y tiene mayor sensibilidad que los penetrantes coloreados.

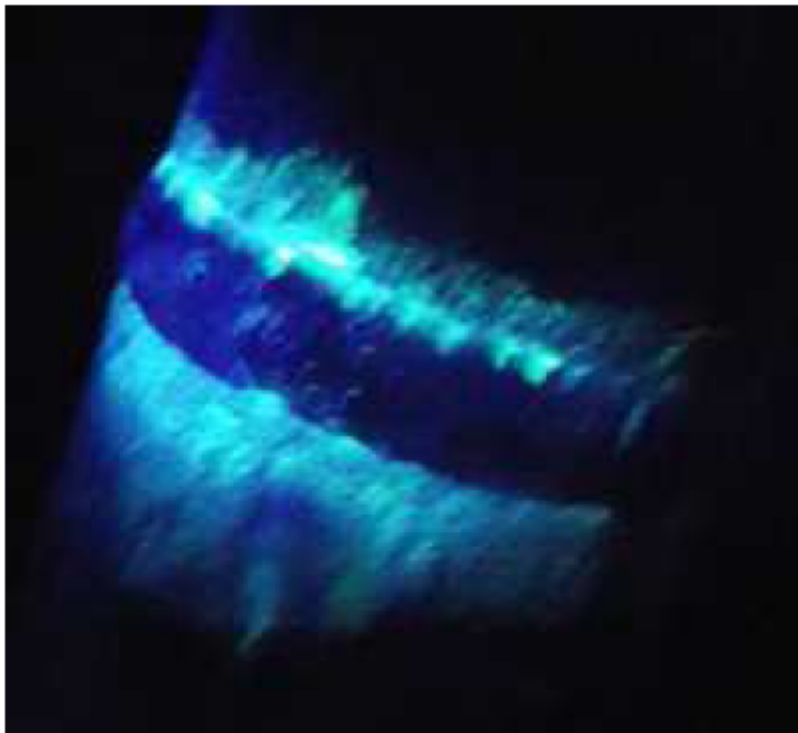


Figura 6.4. Inspección con penetrante fluorescente.

6.8. MÉTODO DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL

Se basa en el análisis del diferencial de absorción de radiación penetrante por parte del material inspeccionado. Cuando existen diferencias de densidades, variaciones en los espesores de las partes o diferencias en las características de absorción debidas a variaciones de composición de la pieza ensayada, las diferentes porciones de la pieza ensayada absorben diferentes cantidades de radiación. Estas variaciones pueden ser monitorizadas. El término de radiografía se refiere normalmente al método específico que produce una imagen permanente en un film.

Las dos técnicas más estandarizadas son las radiografías por rayos X y las radiografías por rayos gamma. La diferencia fundamental entre ambas es su origen. Los rayos gamma son radiaciones de origen nuclear producidas por la desexcitación de un núcleo excitado pasando a un nivel de excitación menor, es decir de menor energía desintegrando isótopos radiactivos. Los rayos X surgen de fenómenos extranucleares, a nivel de órbita electrónica, producidos básicamente por la desaceleración de electrones.

Las características de los Rayos X son:

- Nivel de energía ajustable (voltaje).
- Alta intensidad: mayores voltajes producen mayores intensidades, longitudes de onda más cortas y mayor penetración.
- Aplicables a todos los materiales, aunque existen problemas con materiales de densidades muy altas o muy bajas.
- Buen contraste y sensibilidad.
- Puede apagarse.

Las características de los Rayos γ son:

- Energía muy alta y poder penetrante. Es una energía fija para cada tipo de fuente.
- La intensidad de radiación decrece con el tiempo.
- Las fuentes son pequeñas y portátiles, pudiendo acceder a zonas estrechas.
- Universalidad: pueden utilizarse en todos los materiales.
- No se requiere potencia, por lo que no hay peligro eléctrico asociado al método.
- Tienen un bajo coste inicial y de mantenimiento, comparándolos con los rayos X.

La radiografía industrial es utilizada generalmente para detectar diferencias de espesor o densidad física de una parte del material, comparada con el resto del material de la pieza. Las diferencias más pequeñas son más difíciles de detectar. Mediante la radiografía puede observarse la pieza en dirección perpendicular a la dirección de radiación emitida por la fuente, por lo que la detección de defectos está asociada a la correcta orientación de la radiación en cada caso. Es un método volumétrico ya que con él podemos localizar defectos tanto en la superficie como por debajo de ésta, pudiendo localizar y dimensionar las fisuras.

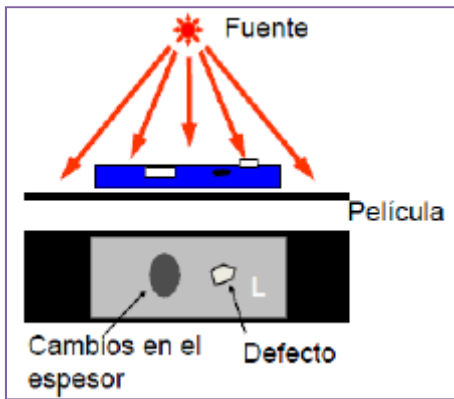


Figura 6.5. Inspección Radiográfica.

Para este tipo de ensayos se requiere un film o película radiográfica, hecha con haluros de plata. Hay distintos tipos de películas dependiendo del tamaño de grano con el que es fabricada, siendo esta característica importante para la resolución y la el buen resultado del ensayo. Hoy en día se está intentando desarrollar técnicas capaces de visualizar en un medio electrónico.



Figura 6.6. Técnica de rayos X con visualización electrónica.

La ventaja de este método de inspección por rayos X o gamma, es que tienen una alta capacidad para detectar defectos internos y subsuperficiales, así como para defectos superficiales.

La limitación del método es que no son capaces de detectar defectos finos y planos, a menos que sean paralelos al haz. También producen riesgo de seguridad al trabajar con ellos, pues se emiten radiaciones, y los costes por ahora no son muy bajos comparados con otros métodos de inspección.

6.9. MÉTODO DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES

El análisis de vibraciones es un método utilizado muy a menudo para determinar la presencia de defectos y caracterizar el estado de los mismos en elementos mecánicos, máquinas, sistemas. Uno de los ámbitos donde es aplicable es en la detección de defectos en ruedas ferroviarias, como por ejemplo un estudio muy interesante sobre detección de planos en ruedas ferroviarias de la Universidad Politécnica de Cataluña.

El análisis de señales de vibración se puede realizar en el dominio temporal mediante el cálculo del nivel de amplitud (rms, pico, etc.), de la función de densidad de probabilidad, de la correlación, o alternatively en el dominio frecuencial ya sea mediante el uso de la TF (Transformada de Fourier) u otras funciones relacionadas con ella como la DEE (Densidad Espectral de Energía) o la DEP (Densidad Espectral de Potencia), dependiendo del tipo de señal que se analiza, transitorio o estacionario. Cada uno de estos análisis, temporal o frecuencial, muestran excelentes resultados en la caracterización de los eventos contenidos en una señal cuando ésta tiene un comportamiento estacionario dentro del intervalo de tiempo finito del análisis. Sin embargo presenta algunas deficiencias en el intervalo, la señal tiene un comportamiento no estacionario, principalmente, si se quiere conocer en que instante hace presencia un componente de frecuencia específica. Los defectos superficiales de ruedas de tren generan unas vibraciones de tipo impulsivo y aunque pueden ser detectados mediante el análisis de las señales en el dominio temporal, en la mayoría de los casos es difícil caracterizarlos totalmente.

Diferentes autores han utilizado el análisis de vibraciones que general el contacto rueda-carril para identificar defectos tanto en la rueda como en el carril. Algunos utilizaron el cálculo del valor rms y la transformada de Gabor de las vibraciones del carril para identificar secciones corrugadas del mismo. Otros identifican las diferencias entre el uso del análisis de la transformada de Fourier tradicional y la transformada de *wavelet* sobre las señales de vibración generadas por el contacto rueda-carril como herramienta de diagnostico del sistema.

El análisis del conjunto tiempo-frecuencia mediante la STFT (Transformada de Fourier en Tiempos Cortos) es una forma de obtener el contenido frecuencial alrededor de un instante de tiempo deseado $t = b$, de una señal de vibración $x(t)$, utilizando un ventana temporal adecuada $\phi(t)$ que al ser multiplicada por la señal original genere la función $f_b(t) = f(t) * \phi(t - b)$. Esta función enmarca la porción de señal deseada y permite aplicar localmente la transformada de Fourier. De este modo, se obtiene la información del contenido frecuencial localizado temporalmente en el dominio efectivo de la ventana. Desplazando temporalmente la ventana se cubre la totalidad de la señal de vibración y se obtiene la información tiempo-frecuencia de la misma. En resumen, en la STFT la señal analizada se divide en pequeños tramos a los que se le aplica la transformada de Fourier. Esto se realiza utilizando la función ventana de ancho constante y que se va desplazando y multiplicando con la señal original.

El principal problema del método es que es necesario encontrar la relación ideal entre ancho temporal y frecuencial de la ventana, pues una ventana muy estrecha analiza segmentos de señal pequeños que permiten una buena resolución temporal, pero una mala resolución frecuencial, ya que solo se podrán observar las componentes de la frecuencia iguales y mayores al inverso del tamaño de la ventana. Por el contrario si la ventana seleccionada es muy ancha, se tendrá una buena resolución frecuencial, pero una mala resolución temporal, ya que si por ejemplo elegimos una ventana de ancho infinito, es decir, un ancho igual al tamaño de la señal es nada más y nada menos que la transformada de Fourier clásica.

La raíz de ese problema viene del principio de incertidumbre de Heisenberg que establece que es imposible conocer una representación exacta tiempo-frecuencia de una señal, es decir es posible conocer el valor de frecuencia en un instante de tiempo dado, asimismo, sólo es posible conocer que componentes de frecuencia existen dentro de un intervalo de tiempo dado.

6.10. MÉTODO DE MEDIDA DEL IMPACTO SOBRE EL CARRIL

Es una técnica muy extendida, que se basa en medir en un carril instrumentado los impactos generados al paso de la rueda sobre el carril. Se evalúan los efectos provocados por las irregularidades, por lo que no son adecuados para evaluar las medidas de los defectos. Las medidas normalmente dependen de la velocidad del tren. Los sensores más utilizados son las galgas extensiométricas (cargas), y los acelerómetros (impactos).

6.10.1. SISTEMAS BASADOS EN GALGAS EXTENSIONOMÉTRICAS

Las galgas extensiométricas son dispositivos cuya resistencia eléctrica varía, al ser sometidos a deformaciones, de forma conocida. Para aumentar la sensibilidad de éstas, se pueden pegar sobre una placa ranurada que opera como un amplificador mecánico.

Uno de los sistemas de galgas más conocido es *WILD* (Wheel Impact Load Detector) utilizado desde 1985 en el Reino Unido. En este sistema las galgas son montadas sobre el velo del carril, para medir las fuerzas en sentido vertical y lateral. El carril instrumentado puede llegar a tener hasta 128 galgas, y la carga estática del vehículo se substrahe de la medida realizada, pero no puede cancelarse el efecto de la velocidad del tren. Cuando un umbral determinado es superado, se activa una alarma para verificar el defecto por otros medios. Toda la información es recogida en una base de datos para poder hacer un seguimiento de los defectos de cada una de las ruedas de cada vehículo.

Otro sistema es *WHEEL CHECK*, desarrollado por AEA Technology Rail en el que se usan también galgas extensiométricas colocadas en el carril para medir la carga vertical de la rueda. La diferencia con el sistema anterior es que la medición se efectúa entre las traviesas, y como en el caso anterior los datos se procesan en un ordenador central.

En general las galgas extensiométricas solo miden cargas verticales (pues son las más importantes para la detección de defectos en la banda de rodadura), pero también se han diseñado sensores para determinar fuerzas verticales y horizontales simultáneamente por el contacto rueda-carril. En este caso un estudio de elementos finitos de la distribución de carga de un agujero practicado en el velo del raíl, condujo a un diseño en el que las fuerzas laterales y verticales pueden desacoplarse. El nuevo sensor incluye dos cojinetes dotados de galgas, los cuales proporcionan medidas que son combinación lineal de fuerzas verticales y de flexión. El posterior procesamiento facilita la extracción de cada componente. Una de las ventajas radica en la facilidad de instalación y mantenimiento, requiriendo entre 16 y 32 sensores para realizar medidas a velocidades relativamente altas, (90 km/h).

6.10.2 SISTEMAS BASADOS EN ACELERÓMETROS

Los acelerómetros son transductores cuya salida es proporcional a la aceleración de una masa constante con o sin amortiguamiento que forma parte del sensor.

La tecnología *MEMS* (Micro Electro-Mechanical Systems) es una de las más utilizadas. En este caso la masa está suspendida en voladizo por una lámina de silicio obtenida por tecnología microelectrónica. Al someter la masa a aceleraciones, sufre desplazamientos que se miden, generalmente, por cambios de capacidad de un condensador formado entre la lámina vibrante y un electrodo fijo a la estructura. Al tratarse de tecnología microelectrónica, estos dispositivos integran amplificadores y acondicionadores de señal para dar una medida proporcional a la aceleración. En algunos casos, también se incluyen circuitos de compensación ante variaciones de temperatura y autocalibrado.

Para medir continuamente el estado de la banda de rodadura se ha propuesto integrar acelerómetros en los rodamientos de las ruedas, midiendo la aceleración vertical. Al integrarse en un vehículo específico, su diseño se particulariza para los parámetros que intervienen en el componente dinámico mejorando su capacidad de discriminación entre rueda sana y con defectos.

Pero generalmente los acelerómetros se montan sobre el raíl, al igual que con las galgas extensiométricas. Pero en este caso resulta más complicado interpretar la aceleración medida como causa de un defecto en la banda, ya que el paso de cada rueda produce una cierta aceleración, y la medida depende de la carga y velocidad del tren.

También resulta complicado desacoplar los efectos de aceleración producidos por las ruedas montadas en el mismo bogie. Generalmente los sistemas basados en acelerómetros detectan que hay un fallo en “alguna” de las ruedas del bogie, por lo que se debe realizar una posterior inspección (por ejemplo manual) que localice y evalúe el defecto, a pesar de que se usan técnicas avanzadas de procesamiento digital de señal.

Otro problema es que los defectos pueden estar ubicados en cualquier posición de la circunferencia de la rueda, mientras que los sensores son situados en posiciones fijas y discretas. La sensibilidad para la detección disminuye con la distancia a la que el defecto entra en contacto con el carril respecto a la posición del sensor. Por lo que hay que utilizar un número de sensores que cubra, sin redundancia, una longitud igual al desarrollo de la rueda (normalmente entre 2,2-3,2 m), pero puesto que el empuje, (distancia entre ruedas de un bogie), puede ser una distancia menor, (aproximadamente de 1,5 a 2,8 m), se mezclarán las indicaciones de las dos ruedas.

Para evitar este problema se ha sugerido dividir el carril de medida en secciones separadas y desacopladas de vibraciones. En su realización solo se usan tres secciones de medida dotadas de acelerómetros, cuya salida se procesa mediante filtros y detectores de umbral. La separación de las secciones produce un fuerte impacto de la rueda sobre el carril que es ignorado mediante una puerta temporal accionada por detectores de presencia de rueda, que simultáneamente miden la velocidad de desplazamiento del tren.

Después se han propuesto otras técnicas que operan sobre un carril convencional, donde se evitan los inconvenientes mencionados y se proporciona continuidad eléctrica para el retorno de la corriente, para lo cual se planteó la instalación de múltiples acelerómetros sensibles a vibraciones verticales en una sección de carril.

Las señales proporcionadas por los sensores se almacenan durante la circulación del tren y son posteriormente procesadas. Para aislar la información de cada rueda, se combinan las indicaciones individuales de los conjuntos de acelerómetros separados por la distancia equivalente al empuje. Por último la presencia de defectos es estimada por cruce de umbral.

Pueden existir otras técnicas que por distintos motivos no parecen fiables para analizar los defectos de forma general por lo que solo se utilizan en situaciones muy especiales y específicas.

6.11. MÉTODO ÓPTICO

La disponibilidad de tecnologías laser, detectores lineales y matriciales, y cámaras de alta velocidad, han permitido desarrollar sistemas de visión artificial para localizar determinados defectos en las ruedas de trenes de forma dinámica y automática. Desde el punto de vista del desgaste los parámetros críticos en el perfil de la rueda son el espesor de la llanta y la altura y anchura de la pestaña. Los sistemas ópticos se centran en determinar la medida de estos parámetros críticos, además de determinar el desgaste no uniforme de la banda de rodadura.

Dentro de esta técnica se han desarrollado a lo largo del tiempo una inmensa cantidad de sistemas, los cuales han ido evolucionando.

Algunos sistemas usan medidores laser de distancia, que pueden ubicarse a decenas de cm de la rueda. Estos dispositivos están formados por un emisor laser puntual y un receptor situado lateralmente a una distancia conocida.

El desplazamiento de la imagen del punto reflejado en un detector óptico lineal proporciona una medida precisa por triangulación. La combinación de varios medidores permite obtener las medidas del diámetro de la rueda, la pestaña, y la llanta. La técnica puede ser mejorada por el uso de cámaras CCD y técnicas de procesamiento de imagen.

El problema de los medidores puntuales es que no dan información precisa del perfil de la rueda, un aspecto importante por los distintos grados de desgaste de la banda de rodadura y su encuentro con la pestaña.

Otro sistema desarrollado después utiliza un laser plano que interseca la superficie de rodadura con un ángulo determinado. Un conjunto se monta debajo de la rueda utilizando un raíl más estrecho haciendo rodar la rueda por la pestaña de manera que deje visible la banda de rodadura. La imagen de la intersección del plano laser con la banda de rodadura se obtiene con una cámara CCD en una zona con mínima velocidad de desplazamiento lo que permite obtener el perfil con una alta resolución. Una posterior mejora permite obtener imágenes a ambos lados de la rueda, obteniendo un avista completa el perfil. (Sánchez-Revuelta 2003).

Muchas de las ideas descritas han sido plasmadas en la práctica existiendo diversas realizaciones comerciales. Como el sistema de visión “*TreadView*” desarrollado por **AEA Technology Rail** que verifica los perfiles de las ruedas del tren cuando este circula a velocidades entre 5-6 mph. Otro sistema es el *Automatic Wheel Inspection System, AWIS*, desarrollado por la compañía ferroviaria **BSNF** y la empresa **LORAM**. Éste se compone por un laser proyectado por un conjunto de ópticas formando un plano. Cuando este plano es cortado por la rueda, se produce una línea de luz sobre la rueda. Una cámara digital con tiempo de exposición muy corto captura la imagen en este instante para su posterior procesamiento, midiendo la altura y espesor de la pestaña, anchura y estado de la llanta y sección transversal del perfil de la rueda. El sistema puede operar con el tren en marcha hasta 70 km/h.

El mayor problema asociado a los sistemas ópticos es su fragilidad, necesidad de ambiente limpio y libre de vibraciones. Por otra parte aunque los sistemas de medida de perfil de la rueda son fundamentales para garantizar la seguridad y evaluar el desgaste, no son adecuados para detectar y cuantificar los defectos de tipo local como los planos, las coqueras o las grietas.

6.12. MÉTODO DE ULTRASONIDOS

Los ultrasonidos son ondas mecánicas de alta frecuencia ($>20\text{KHz}$) que se propagan en medios materiales. Son muy usados en ensayos no destructivos (END) para detectar cambios de impedancia acústica en el medio en el que se propagan las ondas, produciendo una señal de eco indicativa de que existe un defecto.

En este tipo de aplicaciones, el mismo transductor emite pulsos ultrasónicos y recibe los ecos generados (operación pulso-eco). En otros casos se utiliza un transductor emisor y otro receptor, detectado los defectos por los cambios de intensidad en la señal recibida por indicaciones de eco en el receptor.

Los ultrasonidos de alta frecuencia ($>200\text{KHz}$) se atenúan rápidamente en medios gaseosos, (aire), donde además existe una desadaptación de impedancias entre el aire y sólidos (transductor y pieza), lo que conduce a grandes pérdidas de inserción ($>100\text{dB}$). Por esta razón los transductores requieren un medio acoplante interpuesto (agua, plástico, goma, etc.) para insonorizar el material de interés, o alternatively, se sitúan en contacto directo con la pieza a inspeccionar mediante una capa de adaptación de impedancias acústicas.

6.12.1. TIPOS DE TRANSDUCTORES

Piezoeléctricos: En los que un material presenta este efecto produce vibraciones mecánicas con una excitación eléctrica, y convierte vibraciones mecánicas en señales eléctricas. Normalmente se utilizan cerámicas de tipo PZT (titanato-circonato de plomo) por su mayor eficiencia pero existen otros compuestos sintéticos y naturales (cuarzo, por ejemplo). Actualmente buena parte de los transductores piezoeléctricos se realizan en composición con una matriz epoxi (piezocomposites) por su mayor eficiencia y ancho de banda. Su impedancia acústica es similar a la de otros sólidos por lo que puede obtenerse un buen acoplamiento directo transductor-pieza. En otros casos se utiliza acoplamiento de agua (en tanque o mediante un chorro) suelas de plástico o goma. Esta tecnología es la de uso más frecuente en aplicaciones ferroviarias y en otros ámbitos.

EMAT (Electro-magnetic acoustic transducer): Producen oscilaciones mecánicas por la fuerza de Lorentz que aparecen al hacer circular una corriente oscilante en un campo magnético. La corriente oscilante se induce en el material (corriente de Eddy) mediante una bobina. No requieren contacto ni acoplante, ya que generan el ultrasonido directamente en el material, que debe ser conductor. Asimismo permiten obtener distintos modos de propagación, aunque tienen una sensibilidad menor que los piezoeléctricos. Son utilizados con frecuencia en el ámbito ferroviario.

LAHUT (Laser-air hybrid ultrasound transducer): En este caso se utiliza un laser de potencia pulsado, que, por efectos térmicos, genera ultrasonidos en el material impactado. En recepción se utiliza un laser de baja intensidad y un interferómetro. Es una tecnología costosa y de ajuste delicado, pero no requiere ningún medio acoplante. También se a utilizado en el ámbito ferroviario.

Ultrasonidos en aire: Algunos termoplásticos como el PVDF tienen características piezoeléctricas. Otros materiales como el EMFI (ElectroMechanical Film) se comportan como ferroelectretos con capacidad para generar y recibir ultrasonidos. Estos materiales tienen una buena adaptación de impedancia acústica al aire, pero sus niveles de energía son actualmente demasiado bajos para su utilización en ensayos no destructivos (END), en el interior de materiales sólidos.

6.12.2. MODOS DE PROPAGACIÓN

En sólidos los ultrasonidos presentan diversos modos de propagación en función de la forma de vibración de las partículas del material. En sólidos infinitos solo pueden existir ondas longitudinales o transversales y los restantes modos surgen como consecuencia de límites geométricos a la propagación (confinamiento).

Ondas longitudinales (o de compresión): Las partículas vibran en la dirección de propagación y son las únicas que pueden formarse en medios líquidos y gaseosos.

Ondas transversales (o de corte): Las partículas vibran en una dirección normal a la de propagación (shear waves).

Ondas de Rayleigh: Son ondas superficiales que se producen en un material semi-infinito, con una penetración en el material del orden de una longitud de onda, donde las partículas vibran siguiendo trayectorias elípticas.

Ondas de Lamb: Se producen cuando se introduce una segunda superficie límite (una placa, por ejemplo). Producen vibraciones simétricas o antisimétricas en placas con un espesor de varias longitudes de onda y las partículas vibran con una trayectoria elíptica.

6.12.3. TECNOLOGÍA “PHASED ARRAY” Ó ARREGLO DE FASE

Desde hace tiempo se venía observando la necesidad de un nuevo método de inspección para las ruedas nuevas, pues era necesario mejorar la resolución axial (habilidad de separar reflectores que están muy próximos a diferentes profundidades), así como la resolución lateral (capacidad de separar dos o más defectos a la misma profundidad) de la superficie próxima y las pequeñas indicaciones.

Esta tecnología se basa en el uso de transductores contruidos a partir de elementos individuales, en los cuales, cada uno puede ser manejado de forma independiente. Estos transductores son conectados a unidades de control especialmente adaptadas, lo cual permite la recepción y transmisión de señales en forma independiente en cada canal. Este tipo de unidades también deben tener efecto en los retardos electrónicos de tiempo para cada canal, tanto en recepción como en transmisión.

La característica distintiva de esta tecnología es la excitación (amplitud y fase) controlada electrónicamente de elementos individuales en un sensor multi-elemento. La excitación de múltiples elementos genera un haz ultrasónico focalizado que permite modificar dinámicamente los parámetros acústicos del haz, tales como ángulo, distancia focal y tamaño del punto focal por medio de software. Para generar un haz en fase por medio de una interferencia constructiva, los elementos activos de un sensor de arreglo de fase son activados a tiempos ligeramente diferentes. De forma similar, el eco del punto focal deseado golpea los elementos del transductor con una diferencia en tiempo. Los ecos recibidos para cada elemento son retrasados en tiempo antes de ser sumados.

El resultado de esta suma es un barrido que enfatiza la respuesta del punto focal deseado y atenúa los ecos provenientes de otros puntos en la pieza.

Con arreglo de fases se puede hacer un barrido electrónico sin tener que mover físicamente el transductor, utilizando lo que se conoce como transductor virtual.

Para algunas aplicaciones que implementan el barrido electrónico no todos los elementos del “phased array” son utilizados simultáneamente. En este caso, la unidad de control utiliza el concepto de “dynamic multiplexing” para poder distribuir los elementos activos a lo largo de todos los elementos del “phased array”.

6.12.4. TIPOS DE SISTEMAS

Desde hace décadas se utilizan técnicas ultrasónicas para la inspección de ruedas y otro material ferroviario. Las primeras especificaciones fueron implementadas por la AAR a finales de los años 60, definiendo defectos en velo y llanta.

6.12.4.1. Sistemas EMATs

En Europa se usan sistemas que incluyen palpadores electromagnéticos acústicos (EMATs). Se trata de un método que introduce ondas en las ruedas que viajan por la superficie de las mismas (ondas de Rayleigh).

Para obtener una onda superficial se calcula el ángulo de inclinación a través de la Ley de Snell, así las ondas se reflejan tangentes a la rueda viajando a lo largo de su periferia.

También se coloca un segundo palpador opuesto al primero y manda ondas que se reflejan en dirección opuesta a las primeras. Si la onda encuentra un defecto parte de la energía es reflejada, siendo recibida de nuevo por el palpador.

El uso de ondas superficiales puede tener algún inconveniente, ya que al viajar estas por la superficie, cualquier irregularidad en la misma provocada por suciedad puede producir una señal.

Estos sistemas se utilizan para detectar defectos cercanos a la superficie ya que la profundidad de inspección que se alcanza es de apenas unos milímetros.

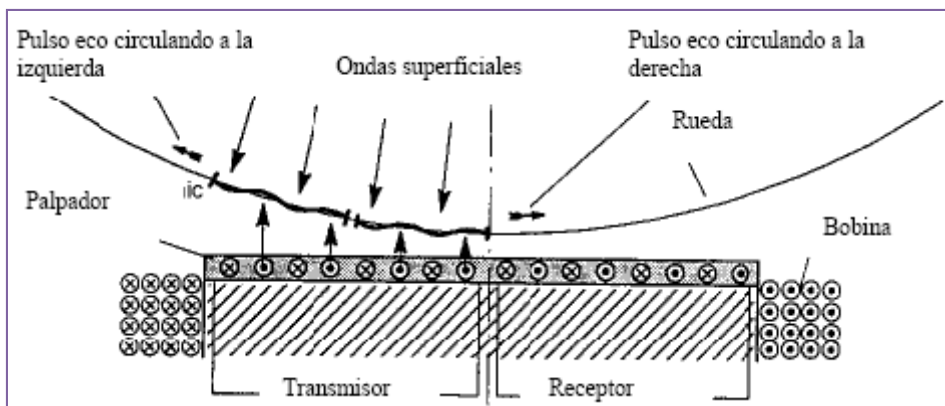


Figura 6.7. Posición de los palpadores EMAT.

4.4.2. Sistemas que miden el campo Residual

Las ruedas nuevas tienen un campo residual de tensiones a compresión debido a su proceso de fabricación. Hay una distribución de tensiones, tras el tratamiento térmico, cuyo máximo aparece próximo a la superficie y que tiende a cero cerca de la transición llanta-velo. Estas tensiones normalmente están entre -50 y 450 MPa. Con una operación de temple se consigue una distribución que tiende a la homogeneidad tanto estructural como de tensiones. Tanto la distribución como el valor de las tensiones dependerán de la forma de la rueda.

Las tensiones residuales tienen tanto una componente radial, como una componente axial muy pequeñas, siendo la componente circunferencial la más importante.

Más tarde las ruedas soportan solicitaciones permanentes o periódicas como por ejemplo durante el calado, o debidas a la carga vertical del peso, o esfuerzos laterales de interacción con la vía, y otros, que modifican el campo residual de tensiones.

Se ha comprobado que las ruedas mono-bloque sometidas a tensiones residuales de compresión demasiado elevadas o demasiado bajas, presentan durante la vida en servicio, de forma más frecuente, tensiones a tracción, es decir, pasan más rápidamente de tensiones de compresión a tracción que otras ruedas.

En las ruedas usadas por lo general sin no ha habido frenadas bruscas, el campo de tensiones iniciales a compresión es mayor. Se produce un incremento de las tensiones residuales debido a la deformación plástica de contacto de rueda. Estas tensiones se miden a través de palpadores electromagnéticos acústicos (EMAT) y palpadores piezoeléctricos.

Las mayores tensiones tractivas se desarrollan entre la zona de contacto y la cara exterior de la llanta. Debido a al daño en esta región y a la deformación plástica sufrida, es difícil obtener un equipo que mida automáticamente las tensiones tractivas.

Un cambio en las tensiones del material se traduce en un cambio en la velocidad de propagación en las ondas a través del mismo. La diferencia en la velocidad de la onda en las direcciones radial y circunferencial permite calcular el estado de tensiones de la llanta, aunque este método no permite conocer la tensión circunferencial directamente. Si bien tiene las ventajas de que la onda transversal es generada por un palpador EMAT, sin necesidad de acoplamiento, la influencia de la temperatura es despreciable, se puede evaluar la diferencia entre tensión radial y tangencial, y la dirección de propagación de las grietas tiene también componentes perpendiculares a la dirección radial, de manera que la diferencia de tensiones es un valor más apropiado para evaluar la mecánica de fractura.

En Europa las ruedas son retiradas normalmente cuando la tensión residual a tracción es mayor de 400MPa, si bien en algunas empresas de mantenimiento se usa el valor de 350MPa.

6.12.4.3. Sistemas Ultrasónicos Manuales

También existen sistemas ultrasónicos manuales que son llevados a cada rueda, de manera que se puede realizar la inspección con la rueda montada en el tren o bien con la rueda desmontada. Sirven ara diversos diámetros de rueda y la medida debe ser rápida y sencilla. Estos equipos portátiles funcionan con baterías.

6.12.4.4. Sistemas para Ruedas Nuevas

Los defectos durante el proceso de fabricación pueden provenir del proceso de baño metálico, el fundido, el proceso de plastificación en caliente o durante la fase de tratamiento térmico. La inspección de ruedas durante la fabricación está amparada por normativas. Se sigue la norma EN 13262 que exige una inspección de la superficie de rodadura en dos direcciones, una radial y otra axial, con calibración a través de FBH de 1, 2 ó 3 mm de diámetro y para profundidades por debajo de la superficie de entre 10 y 50 mm. Esta normativa incluye requisitos similares para la inspección del velo y el cubo.

El uso de las sensibilidades estándar de 1, 2 ó 3 mm no está apoyado por tensiones detalladas o cálculos de vida, sino que se basa en una larga experiencia del uso de este estándar junto con la experiencia en servicio. La ventaja de la inspección de ruedas nuevas, es que se conoce el perfil de la superficie.

Tradicionalmente para la inspección de ruedas nuevas se han usado palpadores rectos y angulares, con ondas transversales y/o longitudinales en contacto directo y frecuencias de 2-5 MHz.

Hoy en día se usan dos palpadores “phased array” con 128 elementos cada uno, colocados en la superficie de rodadura y otro en el lateral. Inspeccionando desde los dos sentidos se asegura que cualquier defecto sea detectado, independientemente de su orientación. La frecuencia usada es de 5 MHz y se activan cada vez 16 elementos. La inspección se realiza en inmersión usando como acoplante el agua, haciendo girar la rueda con un rodillo metálico.



Figura 6.8. Barrido electrónico.

Las ventajas de este método son:

- *Ahorro en Tiempo* – Reducción del tiempo por inspección.
- *Reducción de Operaciones* – Elimina la necesidad de hacer múltiples inspecciones utilizando sensores de ángulo y punto focal fijo.
- *Mayor Detectabilidad* – Permite incrementar la sensibilidad y mejorar la relación señal-ruido al utilizar focalización electrónica.
- *Incremento en Flexibilidad* – Inspección de áreas de difícil acceso desde solo un punto de contacto.
- *Simplicidad de uso* – Reduce o elimina la manipulación mecánica o manual.

6.12.4.5. *Sistemas para la Detección de Defectos en la Banda*

En 1973 se demostró la capacidad de las ondas de Rayleigh para detectar defectos en la banda de rodadura de los modelos de rueda de tren a $\frac{1}{4}$ de escala. Observaron que las ondas de Rayleigh podían ser detectadas tras dar 4-10 vueltas a la circunferencia, lo que facilita la detección midiendo el cambio de atenuación de la onda en cada vuelta a la rueda. Sin embargo esta técnica solo es práctica con ruedas nuevas, resultando difícil establecer patrones de atenuación en ruedas desgastadas y con pequeños defectos superficiales debidos a la fatiga de rodadura.

Este principio ha sido utilizado para la detección de defectos superficiales mediante transductores ultrasónicos montados en un raíl bajo la superficie de rodadura con el tren en marcha. Estos transductores pueden ser de distinto tipo como ya vimos, pero en todos los casos generan ondas de Rayleigh (superficiales) que viajan por la periferia de la rueda (banda de rodadura y pestaña).

Una propuesta utiliza los transductores piezoeléctricos en transmisión, orientados para generar y recibir ondas de Rayleigh. Para cada rueda se disponen dos sistemas de medida ligeramente separados, en los que las señales se hacen circular en direcciones opuestas, de forma que puedan analizarse las indicaciones en cada vuelta del pulso ultrasónico por la periferia de la rueda. Midiendo los tiempos de vuelo por la banda de rodadura y por la pestaña, es posible determinar el diámetro y el grado de desgaste de la rueda.

En algunos trabajos se usa el mismo principio pero los transductores piezoeléctricos son sustituidos por EMATs que se colocan en un cajero abierto en el raíl. También hay sistemas en los que la onda superficial se induce en la banda de rodadura mediante un haz láser de potencia, capturando los ecos mediante transductores ultrasónicos para aire (LAHUT), por lo que al igual que ocurre con los EMATs, no es necesario ni un contacto físico, ni un medio de acoplamiento especial entre la rueda y los transductores.

El problema de este sistema viene cuando la rueda presenta múltiples defectos por fatiga de contacto por la mayor atenuación a las ondas superficiales y la menor sensibilidad de EMAT Y LAHUT en recepción. Siendo además éstos, los casos más importantes al poder ser las fracturas más críticas.

En España la empresa **Patentes Talgo** comercializa y fabrica un equipo detector de defectos superficiales de rodadura llamado **DSR** (Defectos Superficiales de la Rodadura). En él se utilizan palpadores piezoeléctricos para generar y recibir ondas superficiales de 1 MHz, utilizando como medio acoplante una lámina de goma. Los transductores se montan en un sistema mecánico que asegura el contacto con la rueda durante la inspección. Cada palpador lleva asociados dos detectores de proximidad inductivos que indican la presencia de la rueda sobre el mismo. Se llega hasta una profundidad de defectos sobre la banda de 4 mm. Al paso de la rueda sobre los palpadores de vía, el sistema emite un pulso de ondas de superficie, este se transmite por la banda de rodadura dando varias vueltas a la rueda antes de extinguirse. Si en el camino el pulso encuentra algún reflector (inclusiones, exfoliaciones, fisuras, etc.), el pulso se divide idealmente en dos, uno que continúa viajando en la dirección original, y otro reflejado que se propaga en sentido contrario. La señal registrada es amplificada, filtrada y procesada para obtener su envolvente, obteniéndose un registro.

Estos sistemas son adecuados para la detección de grietas en sentido axial y no tanto para las que se desarrollan en otras direcciones. Es muy difícil diferenciar el tipo de defecto por el que se produce la indicación y cuál es su tamaño.

6.12.4.6. *Sistemas para la Detección de Defectos en el Volumen de la Rueda*

Para los defectos en el velo y la llanta se han desarrollado normas de inspección, especialmente para ruedas nuevas, con diferentes grados de exigencia. Las normas establecen el tamaño crítico de defectos internos equivalentes a un taladro de fondo plano. Normalmente las normas (UIC812, ISO4958, AAR, EN13262, DBTL, BS5892 y RD32.144) requieren que las indicaciones de defectos internos estén por debajo de las de los taladros de 1 a 3 mm en función del destino de la rueda, siendo más exigentes (1 mm) para las ruedas de alta velocidad. Las normas tienen en cuenta la zona ciega de 20-30 mm que se produce por la interfaz de la banda de rodadura.

Generalmente la inspección se realiza con la rueda desmontada, generalmente en inmersión. Se colocan uno o más transductores mono-elemento que introducen el sonido en la rueda a través de la banda de rodadura, principalmente para detectar defectos en sentido tangencial. La rueda se hace girar mientras que los transductores se desplazan en dirección axial, facilitando así la inspección de la llanta y el velo. Esta técnica se utiliza en la estación realizada por **Railway Technology** para inspeccionar ruedas montadas en el bogie con los transductores actuando en “pulso-eco”.

Alternativamente se pueden utilizar pares de transductores ultrasónicos en contacto directo con la rueda, operando en “pitch-catch”, para detectar defectos en sentido tangencial, en el velo de la rueda. La distancia entre ambos transductores limita la profundidad a la que éstos pueden detectar defectos, lo que hace necesario utilizar múltiples pares de transductores para poder evaluar todo el velo. Por otra parte, las grietas en sentido radial se detectan por pulso-eco con transductores angulares.

Para evaluar las ruedas en servicio la compañía alemana **DB AG** tornea las ruedas cada 250.000 Km (reperfilado). Tras el torneado las ruedas se inspeccionan con la estación **AUREA**. Este sistema utiliza unos cabezales con múltiples transductores mono-elemento, con diversas orientaciones para detectar defectos en el interior. Para detectar fisuras internas utiliza corrientes inducidas. El sistema es rápido a la hora de tomar medidas, pero la necesidad de desmontar la rueda, supone un coste elevado por el tiempo que esto conlleva.

Es por esto que la **DB** ha instalado el sistema **UPPE** que permite hacer una verificación de la rueda montada. Con un sistema hidráulico se levanta el eje dejándolo libre de contacto con el carril, y gira por medio de rodillos. Mediante un brazo articulado que contiene múltiples transductores ultrasónicos los cuales se ponen en contacto con la superficie de rodadura se ejecuta la inspección. Luego se procesan los datos que permiten detectar una gran variedad de defectos internos.

La empresa **Interlab** en España ha desarrollado para **RENFE** un equipo de inspección y medida de datos automático, **ULTRASEN**. Se trata de un equipo de ultrasonido de seis canales, con ganancia, retardo y campo, programables independientemente para cada canal. Se utilizan dos subconjuntos de tres palpadores cada uno, uno para cada rueda de un mismo eje. Dos de los palpadores del subconjunto tienen orientación angular y el restante orientación radial. Al igual que en el caso anterior hay un sistema hidráulico que eleva el eje y lo hace girar mediante rodillos. De este modo se pueden detectar grietas en el velo, particularmente en la zona de los taladros de sujeción de los frenos de disco.

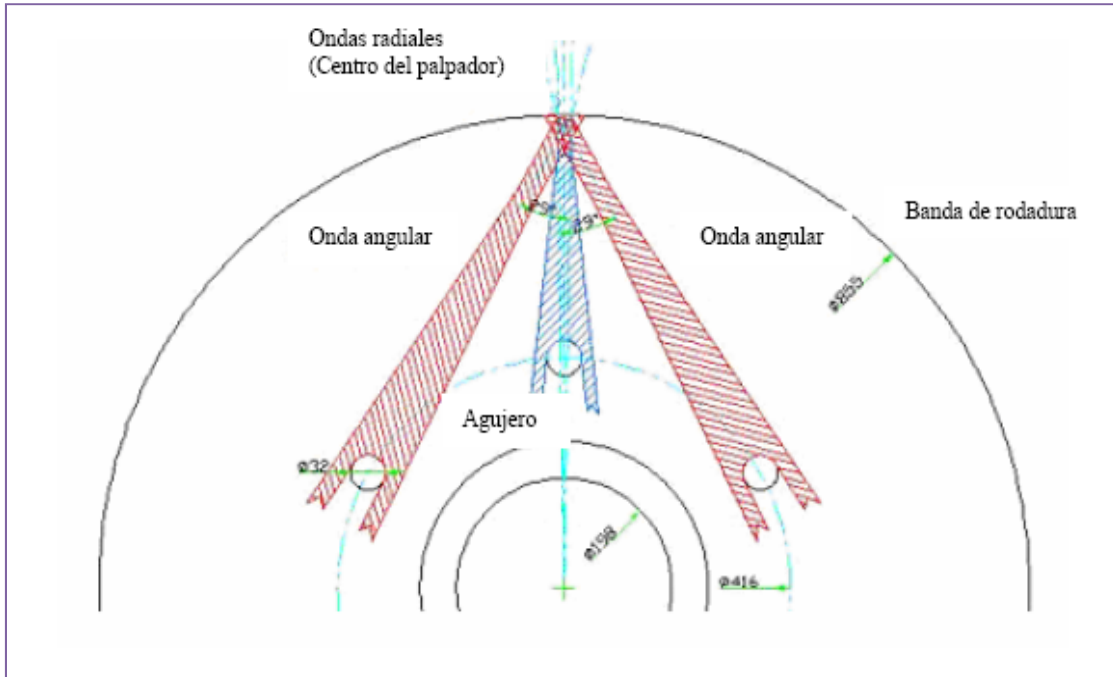


Figura 6.9. Posicionamiento de los Palpadores en el sistema ULTRASEN.

La empresa **Dano-Rail** ha desarrollado junto con un grupo del CSIC un sistema de inspección de llanta y velo con técnicas “Phased Array” (D 0100 VR).

En una revolución de la rueda se obtienen 360 imágenes, realizando un posterior procesado para analizar si hay defectos en la llanta y en el velo de la rueda. Es una técnica muy robusta porque permite detectar defectos desde múltiples direcciones (opera con redundancia) y, además, es independiente de la orientación de la grietas. Estos sistemas son rápidos ya que no requiere desmontar la rueda, aunque el tren deberá posicionarse con cierta precisión para situar cada eje sobre el puesto de medida. Idealmente la inspección debería realizarse con el tren en marcha (lenta) y de forma automática.

Una técnica recientemente propuesta dispone los transductores sobre un carro que discurre por un raíl paralelo a los raíles por los que circula el tren a muy baja velocidad. Un sistema de seguimiento de la rueda controla el movimiento del carro, en el que se montan varios transductores en inmersión parcial (usando chorros de agua). El sistema realiza adquisiciones de señal ultrasónica a lo largo de una longitud equivalente a la circunferencia de la rueda en varios sectores de $\frac{1}{4}$ de vuelta (se montan 4 sistemas para cubrir los 360° de la rueda). Cada carro regresa a su posición original al finalizar su sector. El procesamiento de estas señales permite detectar defectos en el interior de la llanta y en la banda de rodadura.

6.12.4.7. Sistemas basadas en el Efecto Doppler

Con la tecnología ultrasónica parece interesante explotar la situación de movimiento de la rueda para detectar defecto utilizando el efecto Doppler, pero hasta ahora hay poquísimos estudios al respecto.

Una notable excepción es el trabajo de Wooh publicado en el 2000, para la detección de grietas superficiales de un disco rotando a alta velocidad. Se usan dos transductores ultrasónicos para aire, operando en onda continua de 100 KHz. El desplazamiento de frecuencia Doppler es proporcional a la relación entre la velocidad del móvil y la velocidad de propagación de la señal ultrasónica. Con una velocidad ultrasónica del disco de 28,6 m/s y en aire ($c=340$ m/s), la desviación de frecuencia Doppler es de unos 8 KHz, pudiendo detectarse mediante análisis de Fourier o filtros paso-banda. Los resultados muestran la capacidad del método para detectar grietas de tan solo 0,1 mm en la superficie pulida del disco.

Esta misma técnica fue propuesta en 2001 por Wooh, para detectar defectos en los raíles, instrumentando un vehículo con transductores acústicos sin contacto. Su utilizan un ar de transductores ultrasónicos para aire, uno como emisor hacia el carril y otro como receptor de la señal que éste produce por reflexión especular. Parece que en principio debido a la desadaptación de impedancia acústica aire-acero, la técnica solo es aplicable a la detección de defectos superficiales, los cuales se pueden detectar mediante técnicas convencionales en pulso-eco.

Otro estudio publicado en 2007 por Brizuela, pretende detectar defectos de planos en ruedas sobre trenes en marcha mediante el uso del efecto Doppler. La idea que plantea es que, cuando la rueda se mueve sobre su parte circular, el punto de contacto rueda-carril se mueve a la velocidad del tren respecto a una referencia fija en el carril. Al llegar a un plano u otra discontinuidad, la velocidad instantánea del punto de contacto varía. Cuando hay un plano, el punto de contacto rueda-carril se detiene un cierto tiempo, mientras que la rueda pivota sobre el primer borde del plano, volviendo a obtener la velocidad nominal tras pivotar sobre el segundo borde. Por ejemplo, en un plano de 40 mm y un tren cuya velocidad es 3 m/s el tiempo en el que el punto de contacto está detenido es de 13,3 ms, lo cual es perfectamente medible.

Este trabajo obtuvo resultados experimentales que permitieron detectar varios defectos practicados en ruedas a escala. Sin embargo para poder medir la longitud de defecto es necesaria una buena resolución temporal, y para discriminar el desplazamiento Doppler es necesaria una buena resolución en frecuencia, siendo imposible satisfacer ambas condiciones a la vez. La conclusión del trabajo fue que con este método se podían detecta planos pero su cuantificación resultaba problemática.

6.13. FRECUENCIA DE INSPECCIÓN

La forma más interesante de inspección sería hacerla con la rueda montada, sin tener que perder tiempo en los procesos de calado y decalado. En un tren puede haber más de 80 ruedas para controlar, con lo que el tiempo necesario por la inspección es considerable, normalmente se dedica un día entero para la inspección del tren, haciendo además otras verificaciones en el tren. Estas se han venido haciendo de forma manual de ahí el elevado tiempo y coste de operación. Pero desde hace algunos años se han empezado a construir y utilizar métodos automáticos de inspección, los cuales reducen el tiempo y el coste de operación.

Los periodos de inspección en Europa son variables, viniendo éstos determinados por la normativa vigente en cada país, por lo que vamos a mencionar unos cuantos ejemplos.

En Italia los ferrocarriles (FS) y TAV inspeccionan las llantas de los trenes de alta velocidad y las locomotoras cada 200.000 km de media y siempre lo hacen después de un torneado. En estas inspecciones se buscan defectos mayores de 1 mm. A parte de esto, los vagones que circulan a velocidades iguales o superiores a 200 km/h se inspeccionan exhaustivamente cada tres años, así como los velos de ciertas locomotoras se inspeccionan cada 80.000 km

Los ICE alemanes se inspeccionan aproximadamente cada 250.000 km.

En el Reino Unido normalmente utilizan sistemas de ultrasonidos para la inspección de ruedas, cada 240.000 km o cada 200 días de servicio.

En Japón sin embargo se realizan inspecciones de ruedas y ejes en los trenes de alta velocidad cada 30.000 km o 30 días de servicio. Los bogies se suelen inspeccionar cada 450.000 km o 1 año de servicio.

La AAR lanzó en 2002 una circular de proposición de requerimientos para llevar a cabo la inspección por ultrasonidos de todas las ruedas reperfiladas en los talleres. La inspección a realizar debe utilizar un sistema de ultrasonidos pulso-eco. Los pulsadores deben funcionar a una frecuencia de 5 MHz nominal y debe incorporar una alarma automática. El sistema debe producir indicaciones de todos los ecos rechazables, con una relación de señal a ruido de 15 dB o mayor a todas las profundidades entre 12,7 y 50,8 mm. Se debe aplicar un acoplante adecuado entre el palpador y la superficie que debe estar libre de burbujas de aire. La inspección se debe realizar tras la pasada de acabado. La calibración se realiza con un bloque estándar de referencia que incluye agujeros de fondo de plano de 3,175 mm de diámetro generados desde el diámetro de la llanta perpendicular a la banda de rodadura. Las ruedas se inspeccionan axialmente desde la superficie de rodadura utilizando uno o más palpadores para cubrir el máximo volumen. Cualquier rueda con una indicación mayor o igual al 50% de la referencia estándar será causa de rechazo. Todo el personal que lleve a cabo la puesta en marcha y determine la manera de realizar la inspección deberá estar certificado en ensayos no destructivos en el nivel I.

Renfe inspecciona los velos de los trenes de cercanías cada 40.000 km y los trenes de alta velocidad cada 250.000 km. Esto equivale a una inspección cada 9 meses aproximadamente.

Según Metro Madrid el tiempo en que una grieta tarda en progresar es de años. Realizan inspecciones manuales con ultrasonidos. Suelen hacerse tras el torneado de la rueda que aproximadamente suele realizarse cada dos años. Los equipos se ajustan para detectar grietas del orden de 5 mm. Utilizan como referencia las señales dadas por la FBH de 2 y 4 mm. Si la señal obtenida está por debajo de los 2 mm de la rueda está bien, si está entre 2 y 4 mm hay que hacer un seguimiento y si está por encima de los 4 mm se busca la posición exacta para ver si es posible un reperfilado, y si no es posible se rechaza.

La frecuencia con la que se realizan las inspecciones en los diversos países, busca un equilibrio entre los costes de inspección y los que derivan de la presencia de defectos en las ruedas, aunque siempre buscando un alto nivel de seguridad.

Es posible entender que cuando haya una mayor automatización en los sistemas de inspección, los intervalos entre inspecciones serán menores, llegando a ser una operación más dentro del mantenimiento rutinario como puede ser el lavado del tren. Así habrá un elevado grado de redundancia, facilitando así el seguimiento de los defectos en las ruedas antes de que lleguen al punto crítico.

TEMA 7. PRESENTACIÓN DE CREO ELEMENTS/PRO

7.1. INTRODUCCIÓN

Creo Elements/Pro anteriormente conocido como Pro/Engineer hasta 2010, es un producto de soluciones integradas CAD/CAM/CAE creado por la empresa Parametric Technology Corporation (PTC) a mediados de los 80. Fue el primer software asociativo de modelado paramétrico basado en características.

Creo Elements/Pro es una de las numerosas aplicaciones del sistema constituido por PTC, que tiene otras soluciones como Windchill (gestión de contenidos y procesos), ProductView (simulación avanzada y visualización interactiva), Mathcad (cálculos de ingeniería), etc.

Creo Elements/Pro destaca por incorporar un completísimo set de diseño, análisis y capacidades de fabricación sobre una única plataforma integral escalable.



7.1. Logo Creo Elements/Pro.

Una de las grandes ventajas de Creo Elements/Pro es el carácter asociativo de la familia de soluciones integradas CAD/CAM/CAE que permite que cuando se realiza un cambio en el diseño se refleje de forma automática en el resto de los elementos sin tener que convertir datos, lo cual es muy ventajoso para ingenieros y diseñadores.

La versión que vamos a utilizar en nuestro proyecto es Creo 2.0 que fue lanzada en 2012.

Las funciones a las que atiende este software las vamos a presentar y explicar brevemente a continuación.

7.2. HERRAMIENTAS DE DIBUJO

Creo Elements/Pro ofrece una amplia variedad de herramientas que permiten la generación de una completa representación digital del producto que será diseñado. Además de las herramientas de geometría presenta también la capacidad de generar la geometría de otros formatos de diseño integrado como conductos industriales y cableado completo.

Las herramientas de diseño también están disponibles para colaborar conjuntamente en el desarrollo.

Estas herramientas proporcionan conceptos de diseño real, con lo que pueden ser usados como referencia a la hora de realizar un producto, facilitando la obtención de datos y haciéndolos más comprensivos para el diseñador.

7.2.1. Creo Sketch

Los equipos de desarrollo de productos necesitan generar y capturar más ideas e implicar a más personas en el proceso de revisión de diseño para lanzar al mercado las mejores ideas de productos en el menor tiempo posible. PTC Creo Sketch ofrece la forma más rápida y sencilla de que más personas de la empresa contribuyan con sus ideas de forma gráfica. PTC Creo Sketch es una aplicación de diseño 2D autónoma que permite a los usuarios dibujar o esbozar rápidamente sus ideas como si estuvieran escribiendo en una servilleta. Los usuarios pueden añadir color u otros efectos especiales al esbozo si necesitan transformar un esbozo rápido en ilustraciones terminadas. Los proveedores, los clientes y los profesionales de marketing y ventas ahora pueden comunicar sus ideas de forma más eficaz compartiendo los esbozos digitales creados en esta intuitiva aplicación CAD 2D.

Como parte de la familia de productos PTC Creo, los datos de diseño 2D de PTC Creo Sketch se pueden compartir y reutilizar fácilmente como trazo de esbozo en otras aplicaciones PTC Creo como PTC Creo Parametric. Al aprovechar la aportación de más personas y datos en el ciclo de diseño, puede aumentar la innovación, mejorar la calidad del producto y acelerar muchos procesos de desarrollo del producto.

7.2.2. Creo Layout

Los equipos de desarrollo de productos necesitan optimizar continuamente sus procesos de diseño detallado y de diseño de conceptos para reducir el tiempo de desarrollo y el coste. En ocasiones se crean conceptos 2D detallados en una herramienta CAD 2D y después se cambian a otro sistema CAD 3D o se entregan el diseño 2D a otra persona para que cree un modelo 3D. Volver a crear los datos 2D en 3D malgasta tiempo y puede crear errores al pasar de un sistema a otro. PTC Creo Layout es una aplicación CAD 2D independiente que soluciona este problema permitiendo aprovechar lo mejor de los entornos 2D y 3D en el proceso de diseño. Puede crear rápidamente conceptos de diseño detallados en 2D, añadir información detallada, como cotas, anotaciones, etc. y después aprovechar los datos 2D en el diseño 3D utilizando PTC Creo Parametric. Los datos de diseño se mueven sin trabas entre aplicaciones y se conserva en su totalidad la intención de diseño.

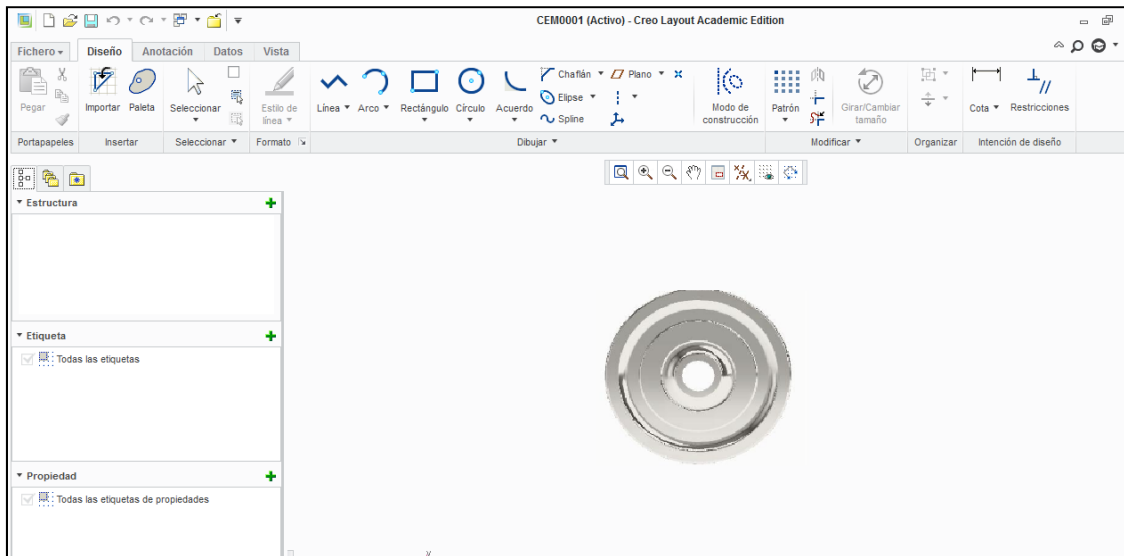


Figura 7.2. Creo Layout.

7.2.3. Creo Schematics

A veces no resulta fácil interpretar diagramas esquemáticos 2D en papel para determinar las rutas de cables y tuberías 3D. PTC Creo Schematics es un software CAD 2D independiente de diagramas esquemáticos para la documentación de sistemas eléctricos y mecánicos y también automatiza la transferencia de datos a PTC Creo para el diseño 3D de cables y tuberías. Además, puede aprovechar los diagramas esquemáticos de Pro/DIAGRAM y controlar los diseños CAD 3D. La eliminación de los errores de interpretación de los datos asegura la compatibilidad lógica con el diagrama esquemático.

7.3. HERRAMIENTAS DE MODELADO

Creo Elements/Pro permite crear soluciones de control numérico y proporciona un rico conjunto de herramientas en el entorno de la industria como herramientas de diseño y simulación de mecanizado, que permite a los fabricantes realizar trayectorias de control numérico y programas de inspección mientras se está elaborando el diseño del producto. Esto posibilita una labor conjunta de los ingenieros de producción y de creación y diseño en una fase temprana de elaboración del producto, permitiendo influir en los diseño mucho antes de su finalización.

7.3.1. Creo Parametric

PTC Creo Parametric es el estándar en CAD 3D, con herramientas de productividad vanguardistas que promueven prácticas recomendadas de diseño a la vez que aseguran la compatibilidad con las normas. PTC Creo Parametric proporciona la gama más amplia de prestaciones de diseño CAD 3D eficaces y flexibles que le ayudan a hacer frente a los desafíos de diseño más exigentes, incluida la adaptación a los cambios en las fases finales, el trabajo con datos de varios sistemas CAD y el diseño electromecánico.

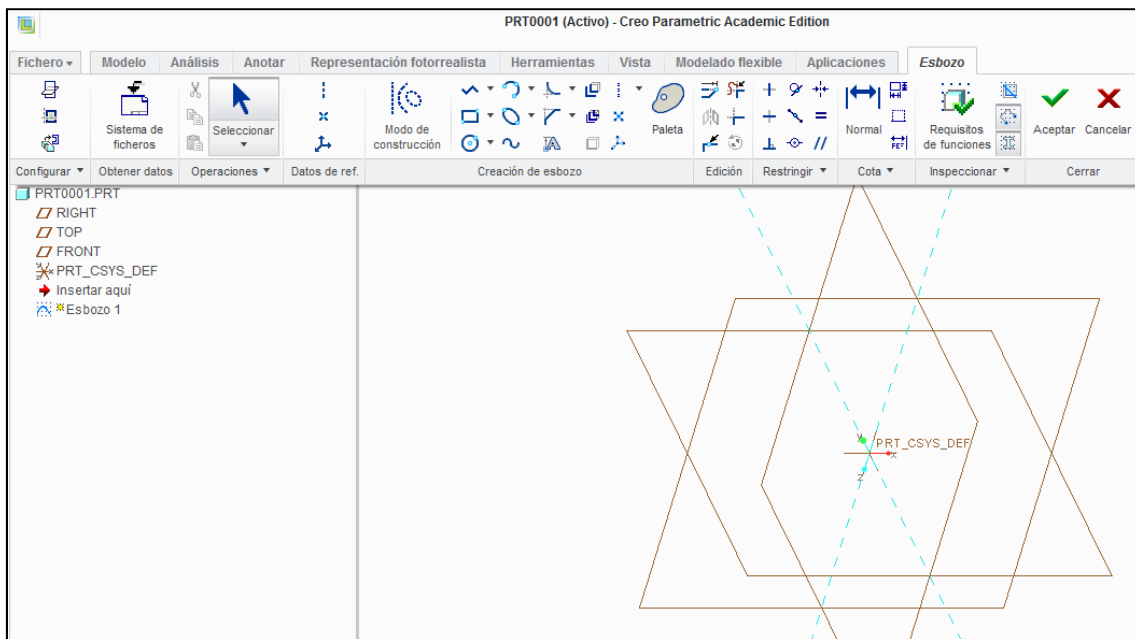


Figura 7.3. Creo Parametric.

7.3.2. Creo Direct

La tendencia actual de las empresas para conseguir mayor eficiencia, mejores diseños y de forma más rápida supone implicar en el desarrollo de productos a más personas. PTC Creo Direct es una aplicación CAD 3D autónoma para una amplia gama de usuarios de la empresa. La creación y la modificación de diseños 3D son rápidas y fáciles, especialmente para quien realiza la transición de CAD 2D a 3D o para un usuario ocasional.

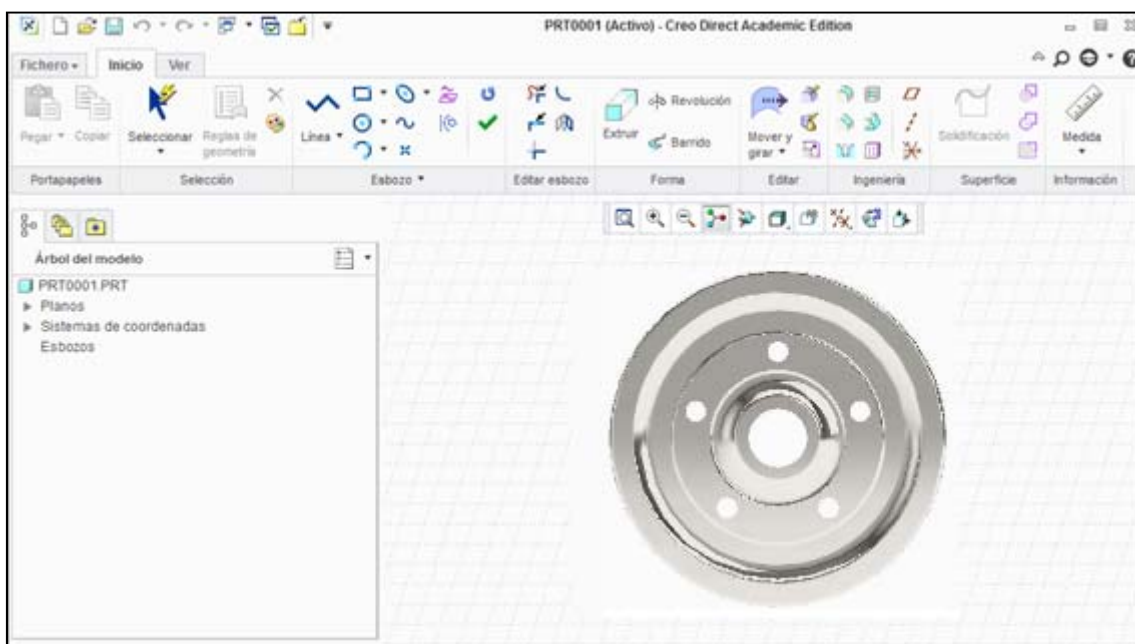


Figura 7.4. Creo Direct.

7.3.3. Creo Options Modeler

PTC Creo Options Modeler es una aplicación dedicada para crear y validar conjuntos de productos modulares 3D, con independencia de la complejidad. Mediante la creación de módulos de productos reutilizables y la definición de su interacción y montaje, los diseñadores pueden crear y validar rápidamente cualquier producto específico para el cliente.

En combinación con el software de gestión del ciclo de vida del producto PTC Windchill de PTC, los fabricantes pueden generar y validar representaciones 3D precisas de las configuraciones de productos definidas mediante una lista de materiales (LDM) individual.

7.4. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

Proporciona numerosas herramientas de análisis térmicos, estáticos, dinámicos, de fatiga FEA con el objetivo de obtener datos fiables y ayudar en el desarrollo del proyecto.

Estas herramientas incluyen factores humanos, tolerancias de fabricación, flujos de moldeo y optimización de diseño.

7.4.1. Creo Simulate

PTC Creo permite la creación de prototipos 3D virtuales para poder probar una amplia gama de propiedades térmicas y estructurales de su diseño en una fase temprana del proceso de diseño detallado, antes de crear la primera pieza física. Como resultado, los ingenieros obtienen información temprana del producto, mejoran los procesos de verificación y validación, y entregan productos de mayor calidad a menor coste. Todo ello sin necesidad de los conocimientos e un especialista en FEA.

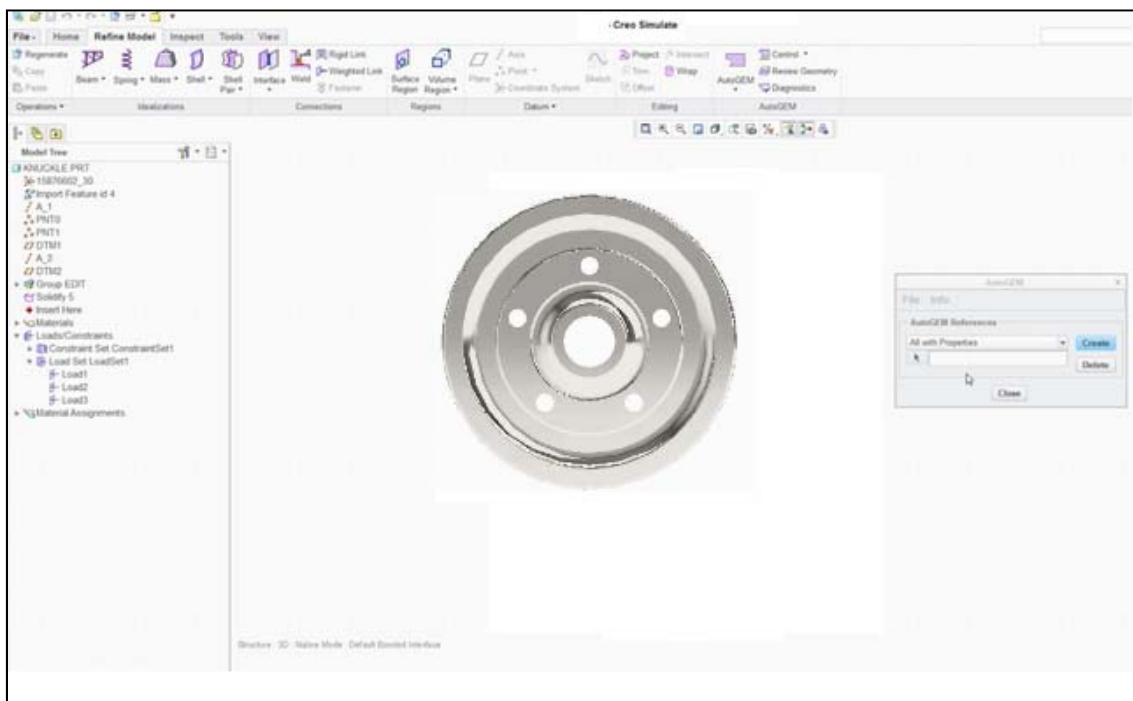


Figura 7.5. Creo Simulate.

7.5. HERRAMIENTAS DE VISUALIZACIÓN

7.5.1. Creo View MCAD

PTC Creo View MCAD permite visualizar productos de forma rápida y sencilla, y obtener valiosa información de ingeniería. Soporta datos 3D de las principales herramientas MCAD, así como planos, imágenes y documentos de multitud de orígenes, sin necesidad de la aplicación de creación nativa. Su formato compacto, preciso y visualizable en 3D permite acceder rápidamente a la información compleja para reducir la repetición del trabajo y mejorar la toma de decisiones.

7.5.2. Creo View ECAD

Permiten visualizar fácil y rápidamente diseños relacionados con PCB de forma aislada o en paralelo con diseños de producto generales. PTC Creo View ECAD soporta datos de PCB de las principales herramientas EDA, así como planos, imágenes y documentos de multitud de orígenes, sin necesidad de la aplicación de creación nativa.

7.5.3. Creo Illustrate

Ofrece información gráfica específica de la configuración que se utiliza para el uso, el servicio y el mantenimiento de productos, y que refleja con precisión el diseño de productos actual. PTC Creo Illustrate ofrece un entorno dedicado con las prestaciones necesarias para crear avanzadas ilustraciones técnicas 3D que se utilizan para comunicar procedimientos y productos complejos de forma clara y gráfica.

7.5.4. Creo View Mobile

Permite visualizar al instante y desde su móvil o tablet modelos 3D de Creo View. Esto incluye modelos desarrollados en otras herramientas CAD y luego publicados en el formato de PTC Creo View.

7.6. TIPOS DE FICHEROS SOPORTADOS

Es importante nombrar y clasificar los distintos tipos de archivos que podemos utilizar en Creo Elements/Pro, para no caer en inconurrencias y errores informáticos.

Los 4 tipos de ficheros más comunes son:

- (*.ASM) Assembly: Archivos de conjunto. Un archivo tipo conjunto puede contener uno a más archivos de tipo conjunto o tipo pieza para ser ensamblados.
- (*.PRT) Part: Archivos de pieza. Un archivo de pieza está formado por un conjunto de funciones (extrusiones, cortes, agujeros, redondeos, etc.).
- (*.DRW) Drawing: Archivos de dibujo. Un archivo de dibujo es un plano en 2D formado por vistas procedentes de los modelos 3D citados previamente.
- (*.STP) Step: Archivos CAD. Los archivos STEP son el formato internacional desarrollado para cubrir algunas limitaciones de las normas de conversión de datos.

TEMA 8. METODOLOGÍA

8.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Como ya hemos explicado en temas anteriores, el presente proyecto tiene por objeto el estudio y análisis de las variaciones modales de una rueda ferroviaria. Este estudio sigue con la línea de investigación emprendida por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid.

En este proyecto analizaremos una rueda de ferrocarril mediante el software de elementos finitos, obteniendo las frecuencias de vibración propias de la rueda. Haremos distintas simulaciones, la primera será la rueda sin ningún tipo de fallo y luego haremos simulaciones de rueda con grietas, en posiciones concretas y con un espesor y área determinada. Al final tendremos los modos de propios de la rueda sin fallo y con fallo, entonces haremos comparaciones de los mismos y como los distintos tamaños y posiciones de las grietas hacen variar los modos de vibración.

A continuación expondremos los pasos seguidos durante la resolución del problema, detallando cada una de las etapas.

8.2. DEFINICIÓN DE LA RUEDA FERROVIARIA

8.2.1 GEOMETRÍA DE LA RUEDA

Lo primero que debemos hacer es determinar la geometría de la rueda a estudiar, la cual se no ha facilitado a través del Departamento de Ingeniería Mecánica.

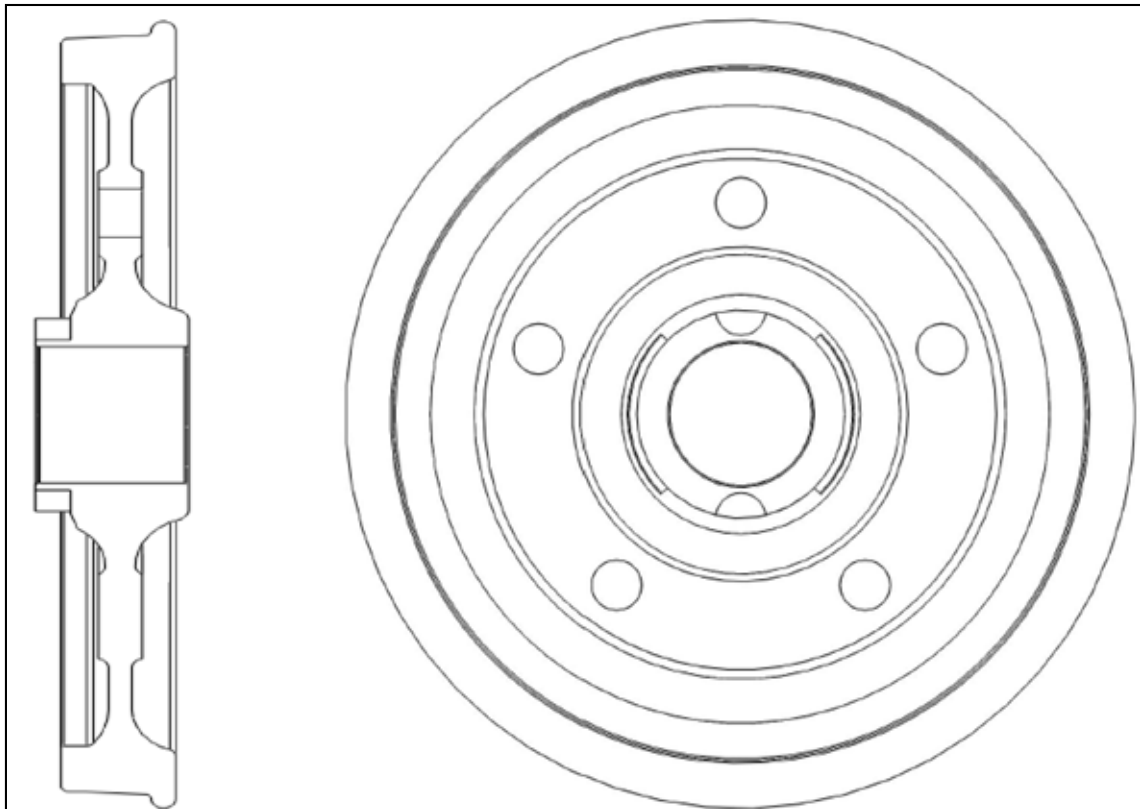


Figura 8.1. Vista del Corte de perfil y Alzado de la rueda.

8.2.2. MATERIAL DE LA RUEDA FERROVIARIA

El material utilizado para la rueda ferroviaria es el acero ER7, muy utilizado en Europa para la fabricación de ruedas de ferrocarril, y sus características son sacadas de la norma UNE-EN 13262.

	Contenido máximo en %										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V	Cr+Mo+Ni
ER7	0,52	0,4	0,8	0,02	0,015	0,3	0,3	0,08	0,3	0,06	0,5

Figura 8.2. Porcentajes máximos de los diferentes componentes del acero ER7

- Densidad: 7.85e-06 kg/mm³
- Límite elástico : 520 MPa
- Resistencia última a tracción : 820 MPa
- Modulo de Young : 210 GPa
- Coeficiente de Poisson : 0,27

8.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO

Para la realización de nuestros análisis vamos a definir las condiciones de contorno de la rueda.

Vamos a realizar el estudio con la rueda libre, sin ninguna restricción de movimiento, pues normalmente los ensayos no destructivos que utiliza la industria ferroviaria para la detección de defectos en ruedas se realizan con la rueda libre, por lo que es una buena manera de aproximar nuestro estudio a los que se realizan experimentalmente y así poderlos comparar.

En cuanto a las cargas externas que intervienen en nuestro análisis tenemos que decir que no vamos a considerar ninguna por la misma razón que en no hemos puesto ninguna restricción de movimiento.

8.2.4. GEOMETRÍA Y POSICIÓN DE LAS GRIETAS

Debido a la gran variedad de defectos que podemos encontrar en la rueda, lo que haremos será localizar las grietas a modelar para realizar nuestro estudio en diferentes partes de la rueda, cubriendo así de forma completa los distintos defectos que se dan en las ruedas ferroviarias. Existe una gran cantidad de posibles grietas a modelar, pero nosotros hemos optado por este tipo tras hacer una revisión de los defectos más comunes que se dan para las ruedas ferroviarias.

Vamos a realizar dos tipos de grietas:

- Grieta circunferencial.
- Grieta radial.

Grietas Radiales.

La grieta radial que haremos va a simular una grieta que se inicie en la superficie de la rueda y avance hacia el interior de la misma en dirección radial. Vamos a suponer que la grieta cubre toda la superficie desde una cara de la rueda hasta la opuesta.

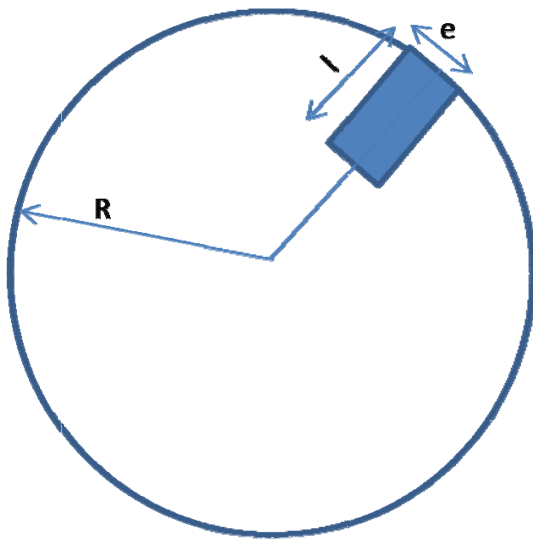


Figura 8.2.1. Grieta Radial.

Como podemos observar nuestra grieta va a depender de tres parámetros, espesor (e), radio de la rueda (R) y la longitud de la grieta (l). Tanto el radio de la rueda (R) como el espesor (e) va a ser constantes para todas las simulaciones, solo variando la longitud de la grieta.

El radio de la rueda (R) es 645,01 mm y el espesor (e) de la grieta es 0,5 mm.

Vamos a poner la longitud de la grieta en función del radio de la misma en %, según la siguiente tabla.

Tabla 8.1. Longitud de la Grieta.

	Longitud de la grieta / [mm]									
% del radio de la rueda	1%	2%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
645,01	6,45	12,90	32,25	64,50	96,75	129,00	161,25	193,50	225,75	258,01
% del radio de la rueda	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	90%	100%
645,01	290,26	322,51	354,76	387,01	419,26	451,51	483,76	516,01	580,51	645,01

Grietas Circunferenciales.

Vamos a simular una grieta que se origina en el velo de la rueda y crece circunferencialmente hasta una longitud máxima de 180 grados.

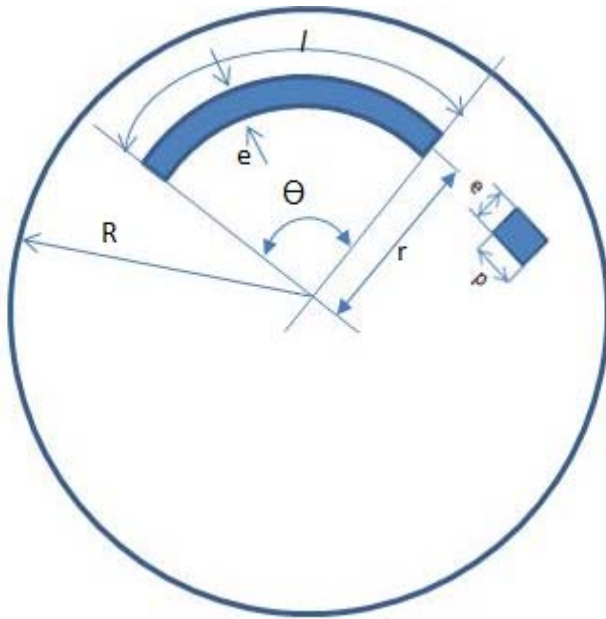


Figura 8.3. Grieta Circunferencial.

Como podemos observar en la figura la grieta circunferencial depende de 4 parámetros, espesor de la grieta (e), radio de la grieta (r), longitud de la grieta (l) y profundidad de la grieta (p). El espesor será constante y de valor 0,5 mm.

Como podemos ver en la figura 8.4 vamos a tener diferentes radios de grieta, en concreto tendremos 4, (r_1 , r_2 , r_3 y r_4) que corresponden con las 4 posiciones de grieta circunferencial

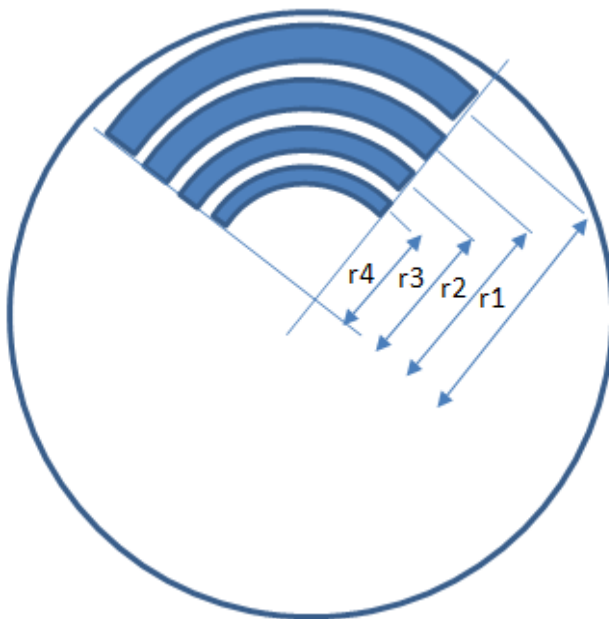


Figura 8.4. Posiciones de la Grieta Circunferencial.

En cada una de las cuatro posiciones variaremos la longitud de la grieta según la tabla 8.2 que tenemos a continuación, resultando así $4 \times 10 = 40$ análisis.

A esto además tenemos que decir que para cada uno de esos 40 tipos de grieta variaremos la profundidad “p”, habiendo tres profundidades que corresponde con el 25, el 50 y el 100% del ancho total de la rueda. Por supuesto este ancho total de la rueda varía dependiendo de la posición (r) a la que nos encontremos. En total entonces vamos a realizar $40 \times 3 = 120$ grietas circunferenciales distintas y sus simulaciones.

Tabla 8.2. Longitud de las Grietas Circunferenciales.

Posicion Radial de la grieta [r]	Circunferencia al radio considerado [C]	Longitud de la grieta l [mm]									
		1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
250	1570,80	15,71	31,42	62,83	125,66	251,33	376,99	549,78	628,32	706,86	785,40
282,5	1775,00	17,75	35,50	71,00	142,00	284,00	426,00	621,25	710,00	798,75	887,50
335	2104,87	21,05	42,10	84,19	168,39	336,78	505,17	736,70	841,95	947,19	1052,43
450	2827,43	28,27	56,55	113,10	226,19	452,39	678,58	989,60	1130,97	1272,35	1413,72

8.3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

8.3.1. MODELADO DE LA RUEDA

Para modelar la rueda ferroviaria lo que vamos a hacer es crear un esbozo del corte de perfil de la misma. Una vez tengamos el corte completamente definido utilizaremos la herramienta “revolución” para crear la rueda. Ya solo quedará hacer un esbozo de los agujeros de freno y hacer una extrusión de los mismos, quedando así la rueda completamente definida.

8.3.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Este análisis consiste en hacer un pequeño estudio previo con el objeto de ver cómo afectan en los resultados finales los parámetros del análisis, estos parámetros son: mallado, método de resolución, orden del polinomio de interpolación, criterio de convergencia y el plotting grid.

Los estudios realizados con MEF, dependerán en gran medida de los parámetros del método de resolución que emplea el propio programa. Es por tanto de gran importancia, encontrar una buena relación entre el mallado, tiempo de análisis, y exactitud de resultados.

Como ya sabemos existen muchos trabajos anteriores que han utilizado Creo Parametrics/Pro como software de resolución para análisis modales, dentro de la línea de investigación llevada por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid. En esos estudios anteriores se llevaron a cabo análisis de sensibilidad para determinar los valores óptimos de los distintos parámetros en la resolución de análisis modales, por lo tanto para mi estudio me haré eco de esos resultados anteriores y elegiré los parámetros óptimos logrados. Según esos estudios los parámetros óptimos son:

- Mallado por defecto.
- Método de resolución “Multipass Adaptive”.
- Máximo orden de polinomio: 9.
- Criterio de convergencia: 2%.
- Plotting Grid: 10.

8.3.3. ANÁLISIS MODALES DE LA RUEDA SIN GRIETA

Una vez tengamos nuestra rueda sin grieta modelada, y sepamos los parámetros óptimos de análisis empezaremos con los análisis modales. En el caso de la rueda sin grieta bastará con hacer un análisis modal o si se quiere un par de ellos para comprobar que los resultados están bien. Estas frecuencias obtenidas en este análisis son las frecuencias que tendremos que comparar con las frecuencias obtenidas en cada uno de los análisis modales de las distintas grietas modeladas en la rueda.

8.3.4. ANÁLISIS MODALES DE LA RUEDA CON GRIETAS

Como se ha expuesto anteriormente vamos a realizar 2 tipos de grietas atendiendo a su tipo (tipo radial y tipo circunferencial).

Con respecto a la grieta radial vamos a realizar 20 análisis simulando el avance de la grieta desde una longitud de grieta 1% del radio, hasta el 100% del radio, según la tabla 8.1. Lo primero es crear el plano donde se inicia la grieta (este plano servirá para los 20 análisis). En este plano creamos un esbozo con la geometría de la grieta y luego hacemos una extrusión con una profundidad del 100% de la rueda con lo que la rueda quedará totalmente perforada. Una vez definida la grieta haremos el análisis modal de la rueda. Esto se hace para cada una de las 20 longitudes de grieta distintas.

Para la grieta circunferencial vamos a realizar bastantes simulaciones más que para la radial. Esto es debido a que vamos a realizar 4 localizaciones distintas de la grieta atendiendo al radio en la que la situemos, también vamos a realizar para cada una de las localizaciones distintas, 10 longitudes de grieta dependiendo del ángulo que cubra la grieta, desde un 1% (3,6 grados) hasta un 50% (180 grados), según la tabla 8.2. Esto supondría $4 \times 10 = 40$ simulaciones distintas, pero además vamos a realizar 3 tipos de profundidad de grieta (25%, 50% y 100%) por lo que en total realizaremos 120 simulaciones distintas de grieta.

Al igual que en la grieta radial se crea el plano donde se realizan las grietas, luego el esbozo, a continuación la extrusión y por último se realiza la simulación.

8.3.5. CÁLCULO DEL ÁREA DE LAS GRIETAS.

Vamos a calcular el área de las distintas grietas que realizaremos sobre la rueda. Este dato no es imprescindible para nuestros análisis, pero si es muy valioso a la hora de la comparación y realización de graficas para las distintas grietas que tenemos.

Grieta Radial: El tipo de grieta radial, no es más que un rectángulo de espesor constante de 0,5mm, y de longitud (l) variable dependiendo del porcentaje de radio considerado, por lo tanto el área de grieta será:

$$A = e \times l$$

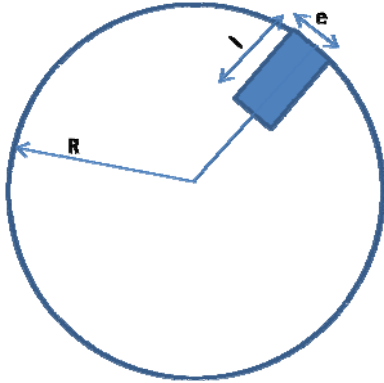


Figura 8.5. Grieta Radial II.

Tabla 8.3. Área de la Grieta Circunferencial.

	Área de la grieta / [mm ²]									
% del radio de la rueda	1%	2%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
	3,23	6,45	16,13	32,25	48,38	64,50	80,63	96,75	112,88	129,00
% del radio de la rueda	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	90%	100%
	145,13	161,25	177,38	193,50	209,63	225,75	241,88	258,01	290,26	322,51

Grieta Circunferencial: El tipo de grieta circunferencial es un trapecio circular, y lo calcularemos como la resta de dos sectores circulares, el mayor se corresponderá con el radio mayor de la grieta (R) y el menor (r) se corresponde con el radio mayor menos el espesor de grieta que como indicamos anteriormente es constante e igual a 0,5mm.



Figura 8.6. Área Grieta Circunferencial.

$$A = \frac{\pi \cdot R^2 \alpha}{360} - \frac{\pi \cdot r^2 \alpha}{360} = \frac{\pi \cdot \alpha}{360} \cdot (R^2 - r^2)$$

Tabla 8.4. Área Grieta Circunferencial.

	Área de la Grieta Circunferencial (mm ²)									
Posición Radial de la grieta	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
P1	7,85	15,71	31,42	62,83	125,66	188,50	274,89	314,16	353,43	392,70
P2	8,87	17,75	35,50	71,00	142,00	213,00	310,62	355,00	399,37	443,75
P3	10,52	21,05	42,10	84,19	168,39	252,58	368,35	420,97	473,60	526,22
P4	14,14	28,27	56,55	113,10	226,19	339,29	494,80	565,49	636,17	706,86

8.4. SIMPLIFICACIONES CONSIDERADAS

El objetivo principal de este estudio es conseguir las frecuencias de vibración de la rueda con las diferentes grietas, por lo que hemos tenido en cuenta algunas simplificaciones:

- Se estudiará únicamente el comportamiento modal de la rueda, sin tener en cuenta el comportamiento del WheelSet completo.
- Vamos a realizar el estudio de los primeros 40 modos de vibración, dejando la rueda libre, sin aplicar fuerzas externas, ya que los estudios de ruedas en la industria ferroviaria se realizan así por lo que creo conveniente seguir esta pauta.
- Los análisis de sensibilidad obtenidos de otros estudios determinan que los parámetros óptimos de Plotting grid y máximo orden de polinomio son 10 y 9 respectivamente pero en mi ordenador solo podía utilizar un Plotting grid máximo de 8 y en vez de Multipass Adaptive, solo puedo usar SingePass Adaptive, debido a la capacidad del mismo.

TEMA 9. DESARROLLO DEL PROYECTO

9.1. CREACIÓN DEL MODELO DE LA RUEDA

Durante este capítulo aplicaremos la metodología descrita en el capítulo anterior, haciendo una completa explicación de cómo se trabaja en el entorno de Creo Elements/Pro.

Vamos a presentar y explicar brevemente cada uno de los pasos realizados en el software para la creación del modelo de la rueda y las grietas. Este apartado no tiene la intención de elaborar un manual sino la de facilitar la comprensión del trabajo llevado a cabo. Para el modelado de la rueda así como para el de las grietas utilizaremos ‘Creo Parametric’, y para la realización del análisis modal utilizaremos ‘Creo Simulate’.

9.1.1 CREACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA RUEDA

Para crear la geometría de la rueda abrimos el programa en el modulo de diseño ‘Creo Parametric’ y creamos un directorio de trabajo que será la carpeta donde se guardaran todos nuestros archivos. Luego abrimos un nuevo fichero, Fichero ➤ Nuevo ➤ Pieza creando un fichero con extensión ‘.prt’.

Empezaremos pulsando el botón ‘Esbozo’ y seleccionamos el plano sobre el que realizaremos nuestro dibujo.

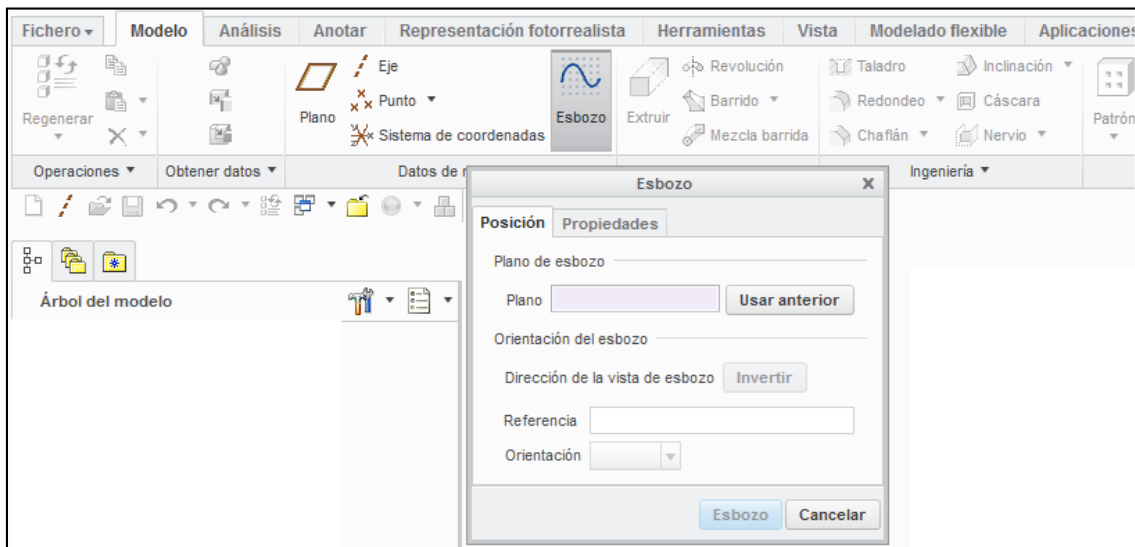


Figura 9.1. Crear Esbozo.

En este plano dibujaremos el perfil de revolución de la rueda en 2D según las cotas facilitadas en el plano.

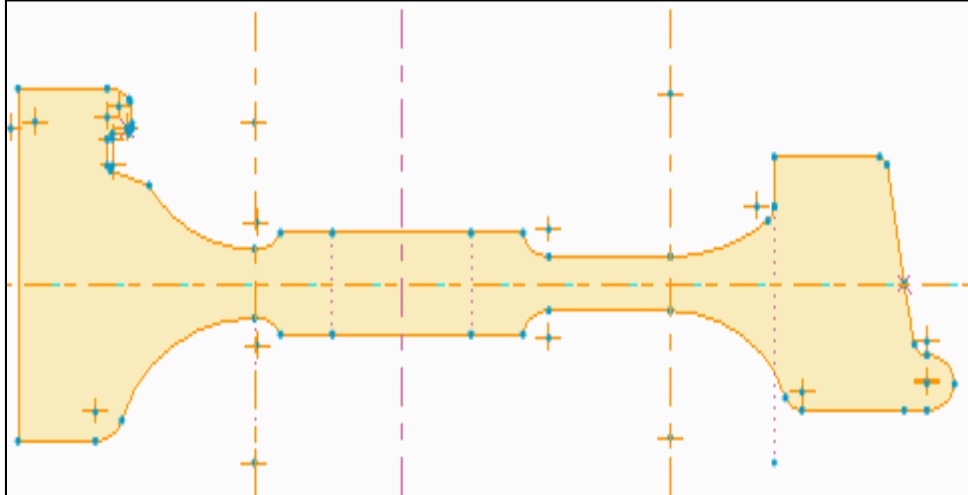



Figura 9.2. Perfil de la Rueda

Tras lograr el esbozo 2D realizamos una revolución del mismo consiguiendo la pieza en 3D.

Esto se hace con el botón 'Revolución' , seleccionamos el perfil como dibujo de revolución y seleccionamos el eje de la rueda como eje de revolución.

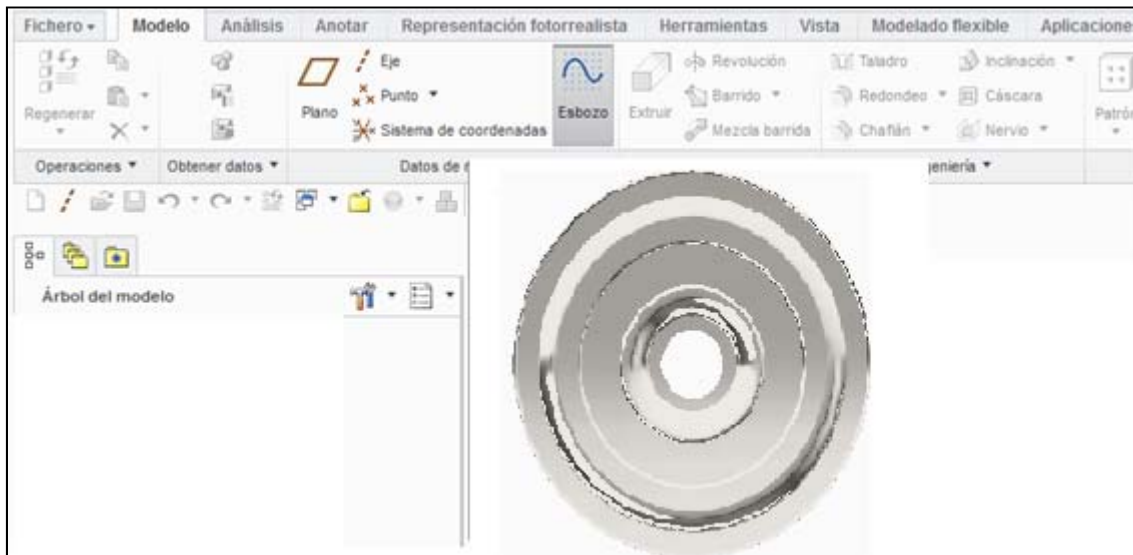


Figura 9.3. Rueda 3D.

En este punto tenemos nuestra rueda 3D casi acabada, ahora necesitamos realizar los cinco agujeros del disco de freno, que perforarán la rueda de un lado a otro. Esta operación se realiza mediante la creación de un esbozo donde dibujaremos un círculo con la dimensión del

agujero de freno, y luego haremos un patrón de revolución en el que necesitamos un eje de revolución que será el eje de la rueda, y el número de círculos equidistantes que queremos dibujar, en nuestro caso 5.

Tras obtener los cinco círculos procederemos con la extrusión de los círculos, quitando material de la rueda de forma que la misma quede perforada por los cinco agujeros.

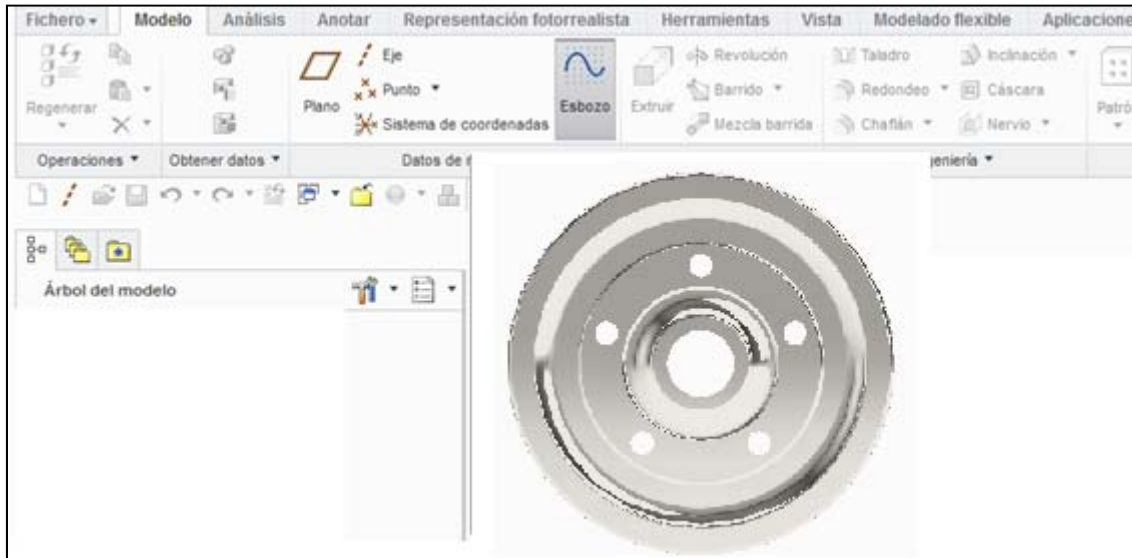


Figura 9.4. Rueda Completa.

Ahora ya tenemos nuestra rueda completamente definida.

9.1.2 DEFINICIÓN DEL MATERIAL DE LA RUEDA

Lo primero que debemos hacer es abrir el módulo 'Creo Simulate' en el cual se puede caracterizar totalmente el modelo, tanto las propiedades físicas del mismo (material), como condiciones externas del modelo (restricciones de movimiento y cargas aplicadas).

Una vez dentro del módulo, para aplicar las propiedades del material, pinchamos en 'Materials'. El material utilizado es acero ER7 (steel) con las propiedades y condiciones que se definieron en el capítulo anterior y que podemos ver a continuación:

- Densidad: 7.85e-06 kg/mm3
- Límite elástico : 520 MPa
- Resistencia última a tracción : 820 MPa
- Modulo de Young : 210 GPa
- Coeficiente de Poisson : 0,27

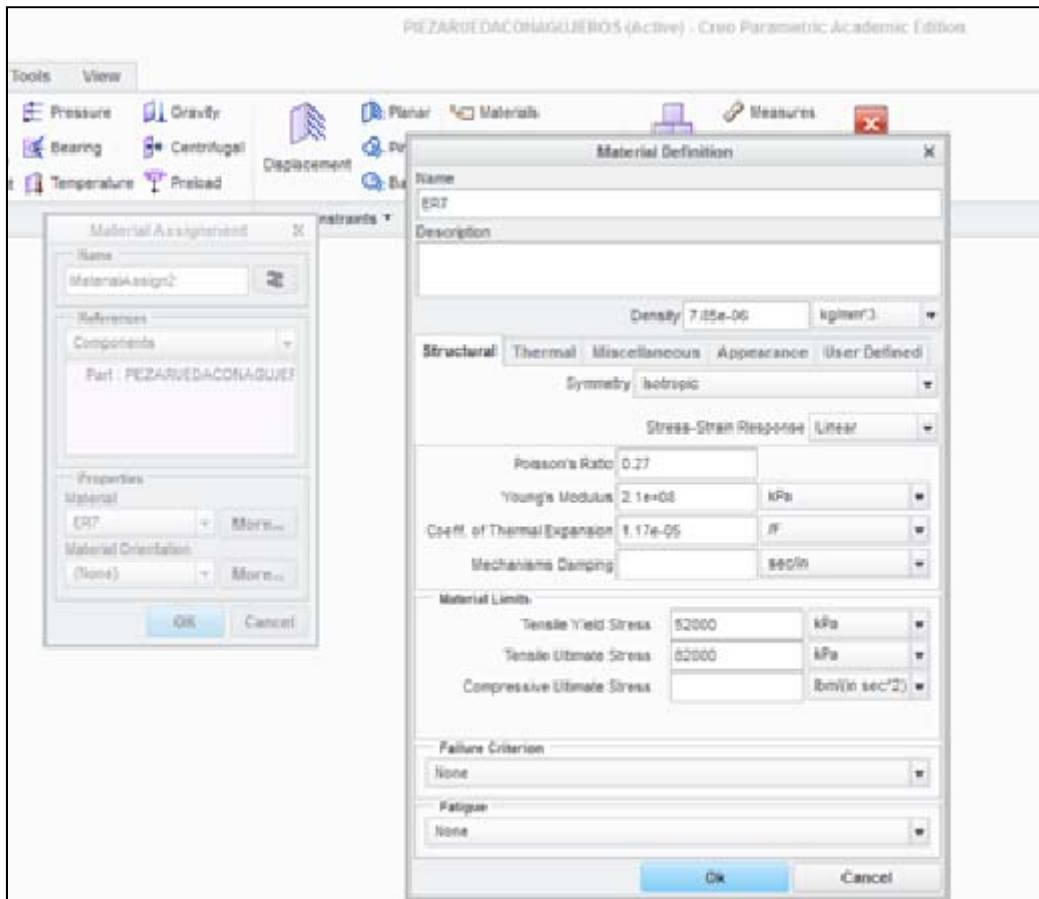


Figura 9.4.1. Características del Material de la rueda ER7.

Una vez definido el material que vamos a utilizar, tenemos que asignárselo a nuestra rueda mediante el botón 'Material Assignment'.

En este módulo 'Creo Simulate' podemos aplicar las restricciones y cargas a las que nuestra rueda está sometida, que en nuestro caso no son ninguna, pues ya lo explicamos en el capítulo anterior que nuestro estudio se realiza sin carga y con la rueda totalmente libre.

9.2. CONDICIONES DE ANÁLISIS

Vamos a explicar y elegir importantes cosas como son el tipo de mallado que podemos utilizar, los parámetros de análisis como el 'Plotting Grid', el tipo de método para llegar a los resultados (Single Pass, Multi-pass Adaptative, quick Check), etc.

Al final de esta sección haremos un resumen con las condiciones elegidas como optimas para nuestros análisis, basándonos en análisis de sensibilidad realizados.

9.2.1. TIPO DE MALLADO

Lo primero que debemos decir es que el mallado de una pieza no es algo trivial, si no que es una parte muy importante a la hora de obtener unos resultados realistas en la aplicación de análisis de elementos finitos, y por lo tanto debemos tratar de encontrar un correcto equilibrio entre coste de tiempo y precisión de los análisis.

Nosotros nos hemos apoyado en los análisis de sensibilidad realizados en proyectos anteriores por otros alumnos que realizaron investigaciones dentro del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid. A continuación veremos un breve resumen de los análisis de sensibilidad realizados y las conclusiones obtenidas de ellos. Hay que mencionar que estos análisis fueron realizados para un eje de ferrocarril.

Mallado tipo 1: mallado por defecto. Esta malla contiene un total de 569 elementos tetraédricos y 240 nodos.

Mallado tipo 2: mallado por defecto con refinamiento de malla en cambios de sección, con tamaño máximo de elemento de 50 mm. Para realizar este mallado, el usuario debe utilizar el comando 'AutoGEMControl', que permite configurar la distribución de los bordes, máximo tamaño de elemento, etc. Con este mallado se generan 2413 elementos tetraédricos y 670 nodos.

Mallado tipo 3: mallado por defecto con refinamiento de malla en cambios de sección, con tamaño máximo de elemento de 25 mm. En este mallado se aumenta la densidad de nodos en los cambios de sección, proporcionando una malla de 6696 elementos tetraédricos y 1736 nodos. En la figura podemos apreciar cómo ha aumentado el número de nodos en los redondeos del eje.

Mallado tipo 4: mallado completo del eje con tamaño máximo de elemento de 35 mm. En el caso de estudios modales, es más beneficioso un mallado más homogéneo que los presentados anteriormente, que son más útiles para ensayos estáticos. En este caso, se ha definido en todo el eje un tamaño máximo de elemento de 35 mm, produciéndose una malla de 16356 elementos tetraédricos y 3896 nodos.

Mallado tipo 5: mallado completo del eje con tamaño máximo de elemento de 30 mm. Con estas condiciones se aumenta aun más la densidad del mallado 4 resultando una red compuesta por 22960 elementos tetraédricos y 5427 nodos.

Por lo tanto, y tras ver este resumen del conjunto de mallas que van desde 569 elementos y 240 nodos a 22960 elementos y 5427 nodos, se realizaron un total de 29 análisis dejando patente la importancia del mallado y comprobando que el mallado con refinamiento en las zonas de concentración de tensiones (cambios de sección) no es el más adecuado para los análisis modales a realizar ya que generan modelos heterogéneos que no se ajustan los suficiente al modelo real.

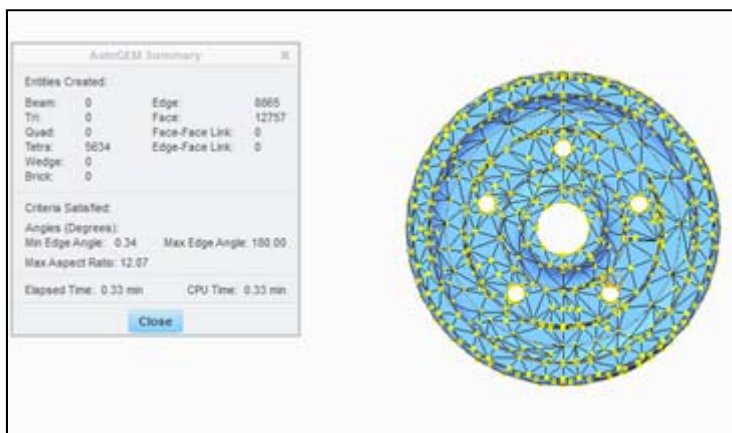


Figura 9.4.2. Mallado por defecto de la rueda.

9.2.2. PARÁMETROS DE ANÁLISIS

Los parámetros de análisis se refieren a todos los ajustes que se pueden realizar en el entorno de 'Creo Simulate', y que determinaran el método de resolución a través del cual se llega a la solución cuando realicemos los análisis modales de nuestra rueda.

Accederemos a 'Creo Simulate' y pincharemos en la opción de 'Analysis and Studies' ➔ 'File' y elegiremos 'New Modal', que es el análisis que queremos realizar. Se abrirá una pantalla donde podremos elegir distintos parámetros de análisis y otras opciones en las distintas pestañas.

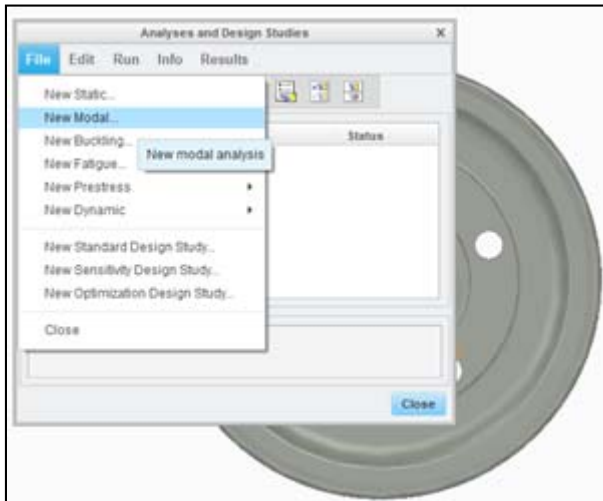


Figura 9.4.3. Tipos de análisis en Creo/Elements Pro.

En la pestaña 'Modes' pondremos el número de modos que queremos obtener, en nuestro caso vamos a analizar los 40 primeros modos. Luego en la pestaña 'Output' podemos elegir los resultados que queremos obtener de nuestra rueda, así como el 'Plotting Grid'.

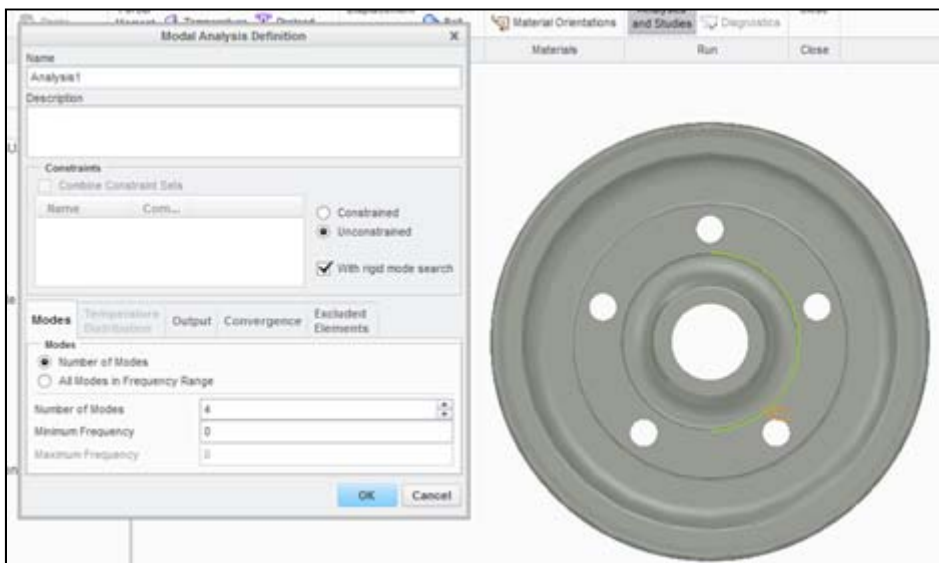


Figura 9.4.4. Pestaña de parámetros.

La fórmula que lo define es $n = (p + 1)^2$ siendo 'p' el valor de 'Plotting Grid' y 'n' el número de resultados por cara. Es decir, una malla de 'p=4' (valor por defecto) estudia 25 puntos de resolución por cada cara de elemento y una malla de 'p=10' estudia 121. Por tanto, es interesante aumentar el valor de 'Plotting Grid' cuando haya pocos elementos en la malla o discontinuidades en los datos de salida.

En la siguiente pestaña, 'Convergence' podemos elegir los distintos métodos de resolución y la precisión de los mismos.

'Quick Check': Es un método utilizado para verificar que las condiciones del problema se han definido bien, un análisis simple en el cual el programa obtiene una solución rápida mediante un polinomio de tercer orden.

'Single-Pass Adaptive': Este método obtiene una primera solución mediante un polinomio de tercer orden, determinando un error de estimación en la tensión local. A partir de este error, el programa calcula una nueva distribución de orden de polinomio y realiza un paso final. En los resultados se muestra un resumen con la estimación del error, con lo que se puede comprobar la calidad de la solución. Si observamos que el error utilizando este método es demasiado grande, sería aconsejable pasar a utilizar el método 'Multi-Pass Adaptive'.

'Multi-Pass Adaptive': En este método definimos el mínimo y el máximo orden de polinomio, además del porcentaje de convergencia. El programa va realizando los cálculos y aumentando el orden de los polinomios para cada elemento de borde. El análisis finaliza cuando el porcentaje de la diferencia entre los resultados del paso actual y el anterior es menor que el porcentaje de convergencia especificado o cuando se alcanza el máximo orden de polinomio.

9.2.3. OPTIMIZACIÓN DE LOS ANÁLISIS

Con los análisis de sensibilidad llevados a cabo dentro del departamento de Ingeniería Mecánica podemos decir que el mallado por defecto a pesar de parecer demasiado escaso, con un elevado valor de 'Plotting Grid', proporciona valores muy cercanos a los de los mallados más densos. Por ello se eligió el mallado por defecto como el óptimo debido en gran parte a la excelente relación precisión de resultados/tiempo invertido y a la fiabilidad ante errores en el solucionador.

El método 'Multi-Pass Adaptive' es más adecuado que el 'Single-Pass Adaptive', aunque la diferencia entre los resultados que devuelven los dos métodos se minimizan cuando la densidad de mallado aumenta.

Todos los parámetros se eligen siempre teniendo muy en cuenta la precisión del análisis frente al tiempo de resolución, pues el tiempo es un factor muy determinante a la hora de realizar un proyecto en ingeniería. Con estas dos variables en mente se determinó que los parámetros óptimos para los análisis serían los siguientes:

- Mallado por defecto.
- Método de resolución 'Multi-Pass Adaptive'.
- Máximo orden de polinomio = 9.
- Criterio de convergencia = 2%.
- Plotting Grid = 10.

TEMA 10. RESULTADOS

10.1. INTRODUCCIÓN

Lo primero que haremos en este tema es presentar los resultados de la rueda sin grieta para ver como vibra la rueda para los distintos modos de la misma.

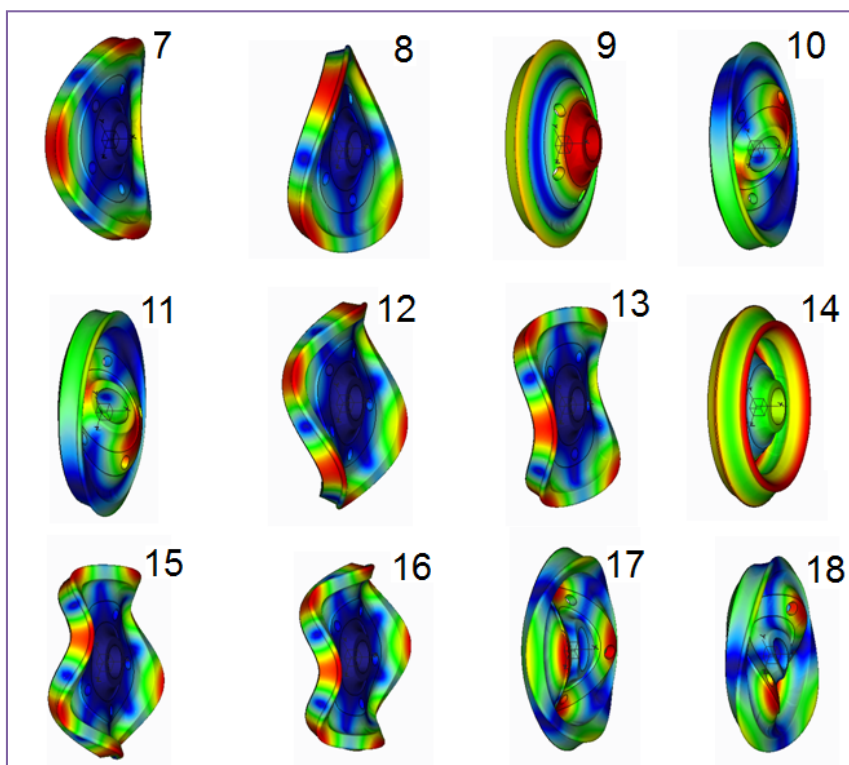


Figura 10.1.1 Modos de vibración de la rueda (7-18)

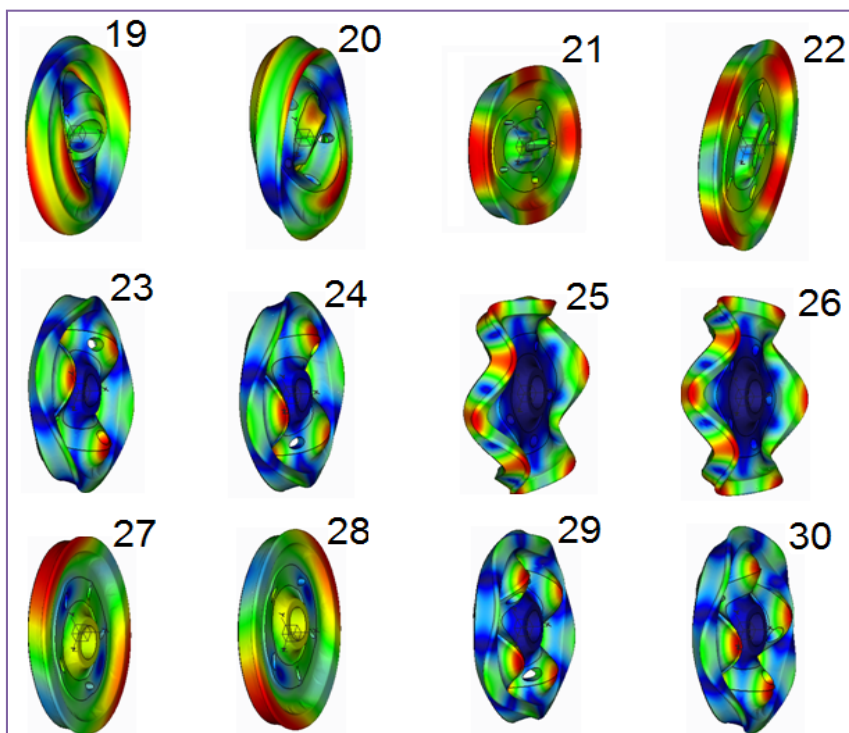


Figura 10.1.2 Modos de vibración de la rueda (19-30)

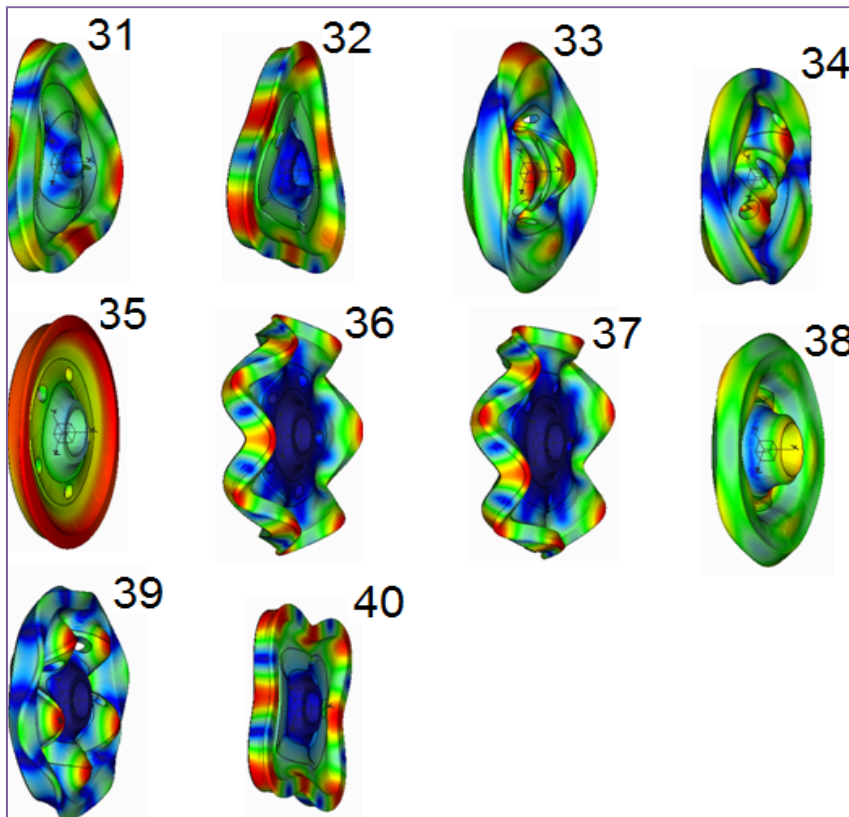


Figura 10.1.3 Modos de vibración de la rueda (31-40)

Hay que recordar que los 6 primeros modos de la rueda corresponden con los 6 grados de libertad de la rueda, por lo tanto sus valores son 0Hz, y no se tendrán en cuenta para analizar los resultados.

A continuación vamos a exponer los resultados obtenidos de los análisis de nuestra rueda de ferrocarril, extrayendo algunas conclusiones sobre estos resultados.

En primer lugar expondremos datos relevantes en nuestros análisis como son las áreas de cada grieta y los porcentajes de avances de las grietas, para tener una visión global del proyecto.

Más adelante expondremos las tablas de resultados de las frecuencias propias para cada grieta analizada, junto con las variaciones respecto a la rueda sin grietas. Las variaciones las expondremos en valor unitario y en valor porcentual.

10.2. ÁREA DE GRIETA VS PORCENTAJE DE AVANCE

Vamos a exponer las áreas de grieta para cada una de las posiciones así en relación a su porcentaje de avance.

Grieta Radial:

Tabla 10.2.1. Área grieta radial según % del radio de la rueda afectado.

	ÁREA GRIETA RADIAL (mm ²)									
% Radio de la rueda	1%	2%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
Área	3,23	6,45	16,13	32,25	48,38	64,50	80,63	96,75	112,88	129,00

	ÁREA GRIETA RADIAL (mm ²)									
% Radio de la rueda	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	90%	100%
Área	145,13	161,25	177,38	193,50	209,63	225,75	241,88	258,01	290,26	322,51

Es importante ver la forma y la magnitud con que varía el área de la grieta en función del porcentaje de grieta que tenemos, es de esperar que al aumentar el porcentaje de grieta aumente el área de la misma. Esto lo podemos observar en la siguiente tabla.

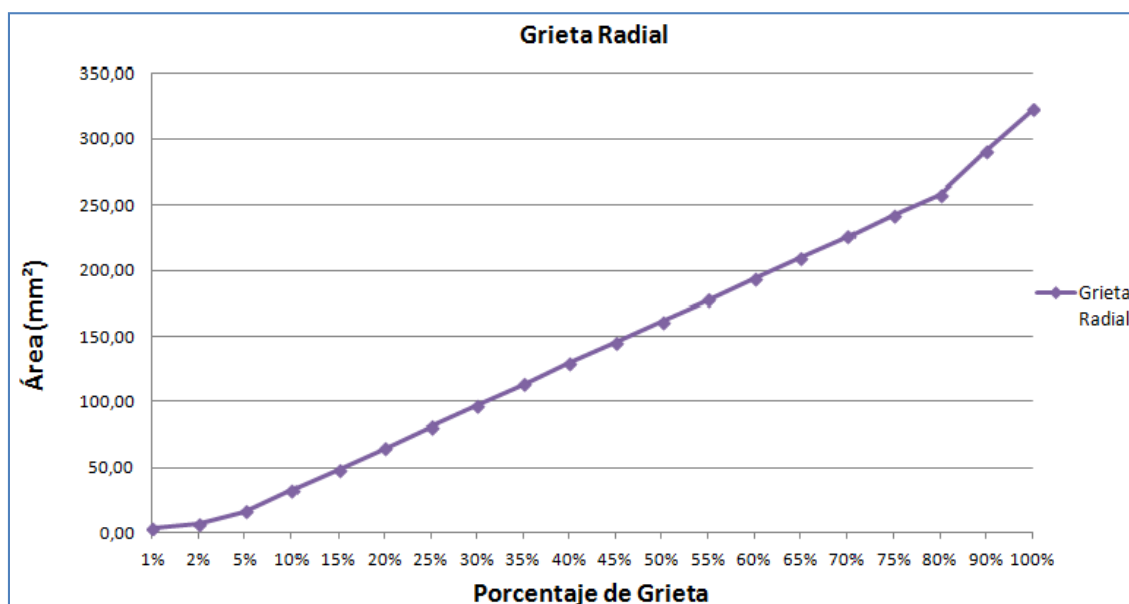


Figura 10.1. Área Grieta radial vs Porcentaje de grieta.

Grieta Circunferencial:

Tabla 10.2.2. Área grieta circunferencial según % del radio de la rueda afectado.

Posición Radial de la grieta	Área de la Grieta Circunferencial (mm ²)									
	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
P1	7,85	15,71	31,42	62,83	125,66	188,50	274,89	314,16	353,43	392,70
P2	8,87	17,75	35,50	71,00	142,00	213,00	310,62	355,00	399,37	443,75
P3	10,52	21,05	42,10	84,19	168,39	252,58	368,35	420,97	473,60	526,22
P4	14,14	28,27	56,55	113,10	226,19	339,29	494,80	565,49	636,17	706,86

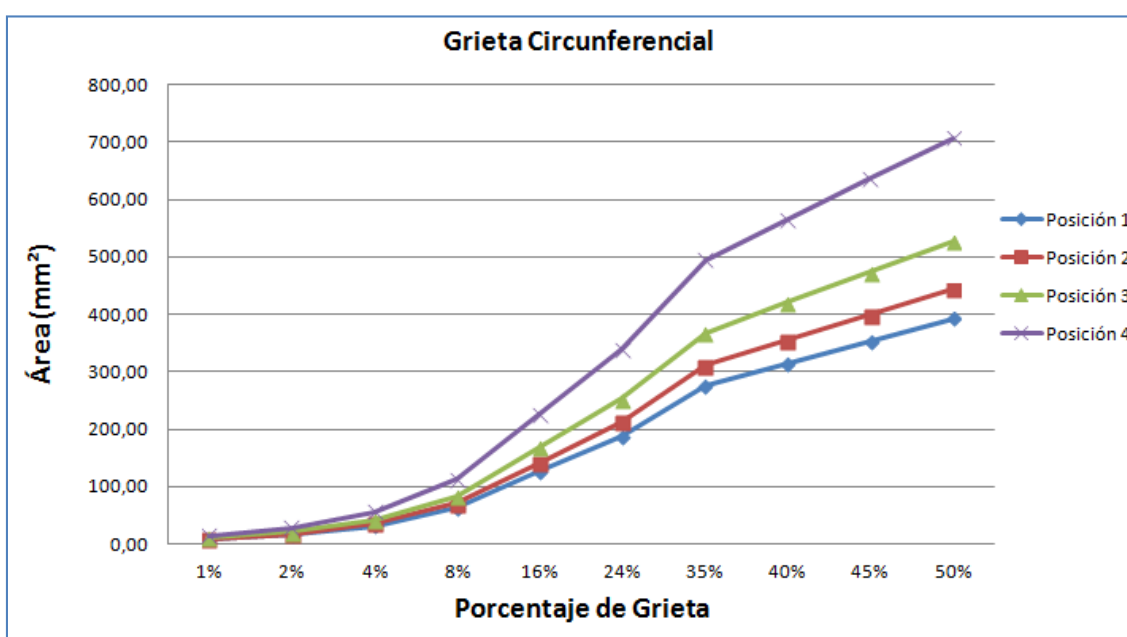


Figura 10.2. Área Grieta circunferencial vs Porcentaje de grieta.

10.3. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LA GRIETA RADIAL

Vamos a ver los resultados obtenidos de los análisis modales de la rueda, de ellos hemos extraído las frecuencias propias o modos de vibración de la rueda para cada una de las 20 grietas que hemos modelado. Hay que apuntar que los valores de '0Hz' correspondientes a los 6 primeros modos de vibración de la rueda en cada uno de los análisis son esperados, pues corresponden con los 6 grados de libertad de la rueda en el espacio, por lo que desestimaremos estos valores para nuestros resultados y conclusiones futuras.

Empezaremos mostrando los resultados de las frecuencias propias de la rueda para la grieta radial.

Tabla 10.3.1. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Radial. (1%-40%)

Grieta Radial		1%	2%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
Modo	SIN FALLO	1%	2%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
Mode7	9,12871	9,13237	9,13022	9,12825	9,07162	8,61393	8,19865	8,08473	8,03349	7,99584	7,96582
Mode8	9,14327	9,14731	9,14617	9,14408	9,10548	8,97303	8,89823	8,88936	8,88359	8,87461	8,87352
Mode9	12,838	12,8517	12,8486	12,8584	12,8306	12,6381	12,4814	12,44	12,4414	12,4217	12,409
Mode10	22,6468	22,6844	22,6781	22,695	22,6238	21,0373	19,9067	19,6264	19,5079	19,401	19,3296
Mode11	22,7596	22,7807	22,7724	22,7846	22,7548	22,5987	22,3863	22,351	22,3196	22,2967	22,2691
Mode12	23,372	23,3745	23,3744	23,3559	23,1835	22,9199	22,7476	22,5942	22,5217	22,4166	22,4026
Mode13	23,3746	23,378	23,3768	23,3646	23,2503	22,9857	22,9417	22,9155	22,9439	22,93	22,9285
Mode14	42,6381	42,6632	42,6871	42,6774	42,1613	38,976	37,3801	36,9882	36,7955	36,6255	36,4989
Mode15	42,778	42,7822	42,7808	42,755	42,5104	41,4883	40,5144	39,9938	39,4385	38,9749	38,606
Mode16	42,7803	42,7841	42,7827	42,7588	42,7431	42,7596	42,7394	42,6961	42,7277	42,6793	42,6947
Mode17	45,8893	45,9324	45,9525	45,9235	45,9013	45,7658	45,6841	45,1344	44,5642	43,9472	43,6028
Mode18	46,1807	46,204	46,2297	46,2111	46,1773	45,9628	45,8499	45,6651	45,7024	45,6216	45,5707
Mode19	53,4808	53,5584	53,5477	53,6146	53,4897	52,8213	52,4148	52,1719	52,0019	51,519	50,516
Mode20	53,6526	53,6582	53,7131	53,7113	53,6685	53,5737	53,47	53,1671	52,8386	52,3484	52,0203
Mode21	56,3334	56,3885	56,3592	56,3041	56,3057	56,3862	56,3026	56,3095	56,2334	54,3582	53,2928
Mode22	56,4473	56,5084	56,4808	56,5098	56,5104	56,5088	56,4936	56,4448	56,3593	56,1873	55,9824
Mode23	64,6425	64,6818	64,725	64,7032	64,56	62,3331	60,9827	58,8058	56,4404	56,4075	56,3685
Mode24	64,7024	64,7684	64,8448	64,7771	64,7024	62,8733	61,0533	59,4472	57,7925	56,8094	56,4105
Mode25	65,7342	65,7403	65,7372	65,6955	65,237	64,8357	63,9887	62,3961	61,9559	61,7901	61,6759
Mode26	65,7599	65,7675	65,7656	65,7211	65,3911	64,9823	64,4502	63,0693	62,6662	62,3435	62,1652
Mode27	74,6976	74,743	74,7141	74,6539	73,6611	69,6929	64,9718	64,8301	64,9408	64,8669	64,7921
Mode28	74,7201	74,7562	74,7425	74,7519	74,7592	74,7512	74,7379	74,6805	74,5786	74,3812	73,9769
Mode29	84,0329	84,092	84,2026	84,1478	84,0244	83,0591	82,2626	79,6358	76,6558	75,0239	74,414
Mode30	84,0507	84,1754	84,2499	84,1802	84,2619	84,0339	83,4746	82,1476	82,1384	82,0083	81,8318
Mode31	85,4183	85,5254	85,5001	85,5442	85,4981	84,9822	84,0833	83,2397	83,1723	83,0781	83,0074
Mode32	85,4999	85,6244	85,5657	85,6164	85,6115	85,5159	84,7062	84,5144	84,6187	84,3295	83,7081
Mode33	85,8501	85,9378	86,0619	86,0172	85,9446	85,6129	85,5106	85,3052	84,9427	84,6009	84,413
Mode34	86,631	86,6932	86,6987	86,7997	86,7475	86,4121	85,3615	85,3038	85,5142	85,4024	85,0478
Mode35	89,5163	89,5367	89,5344	89,5271	89,281	87,8455	86,4918	86,1505	85,8761	85,5618	85,5484
Mode36	91,179	91,1866	91,1857	91,1294	90,4723	88,15	87,1484	86,5318	86,3815	86,2488	86,2243
Mode37	91,1812	91,2008	91,1924	91,1331	90,5185	88,5252	87,6866	87,5059	87,5105	87,4836	87,4704
Mode38	99,7846	99,88	100,328	100,073	100,29	99,9084	100,018	99,3655	99,2264	98,0206	97,3142
Mode39	105,96	106,145	106,271	106,207	106,187	105,768	103,959	102,173	99,7434	99,0858	98,9393
Mode40	106,931	107,035	106,989	106,997	106,809	106,302	105,24	102,421	101,62	101,157	100,782

Tabla 10.3.2. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Radial. (45%-100%)

	Grieta Radial									
	SIN FALLO	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	100%
Mode7	9,12871	7,92043	7,87749	7,82375	7,77217	7,74281	7,74281	7,72392	7,65416	6,85646
Mode8	9,14327	8,86973	8,87904	8,86426	8,85894	8,85781	8,85781	8,85239	8,83172	8,72518
Mode9	12,838	12,3742	12,3289	12,2708	12,1917	12,1469	12,1469	12,1236	12,0553	11,44
Mode10	22,6468	19,2189	19,1154	18,9914	18,8692	18,783	18,783	18,7211	18,5942	15,5363
Mode11	22,7596	22,2216	22,2213	22,0931	21,9688	21,8981	21,8981	21,8568	21,7077	17,8281
Mode12	23,372	22,3832	22,3803	22,351	22,3256	22,2937	22,2937	22,2819	22,257	22,0805
Mode13	23,3746	22,9124	22,8986	22,864	22,8181	22,7977	22,7977	22,7591	22,7161	22,3505
Mode14	42,6381	36,345	36,1605	35,9103	34,5201	33,7035	33,7035	33,3978	32,325	25,1737
Mode15	42,778	38,0519	37,46	36,1419	35,5584	34,815	34,815	34,1091	32,5889	26,9766
Mode16	42,7803	42,6817	42,622	42,1339	41,6238	40,3658	40,3658	39,6317	38,4152	31,6946
Mode17	45,8893	43,1486	42,6875	42,5734	42,0013	41,3965	41,3965	41,1974	40,7992	36,1228
Mode18	46,1807	45,4468	45,1851	44,2001	42,9479	42,7043	42,7043	42,6152	42,365	36,4685
Mode19	53,4808	48,6837	46,947	45,7941	45,4769	45,4691	45,4691	45,3364	45,1365	38,2889
Mode20	53,6526	51,5029	50,982	50,3951	49,8908	49,356	49,356	48,3776	46,0611	42,1941
Mode21	56,3334	52,8759	52,7028	52,5482	52,4004	50,722	50,722	50,2153	49,6893	43,7778
Mode22	56,4473	55,6553	55,1793	54,3683	53,125	52,3181	52,3181	52,2125	51,9521	50,4541
Mode23	64,6425	55,9865	55,7844	55,426	55,0833	54,8196	54,8196	54,7646	54,6075	50,8988
Mode24	64,7024	56,3892	56,398	56,3763	56,3504	56,3222	56,3222	56,2945	55,9605	51,9237
Mode25	65,7342	61,5382	61,4308	61,2114	60,7655	60,6056	60,6056	60,3728	60,0139	57,013
Mode26	65,7599	61,893	61,6995	61,3121	61,1026	61,0232	61,0232	61,0091	60,9448	60,3935
Mode27	74,6976	64,6724	64,5425	64,3633	64,1421	64,2378	64,2378	64,1105	64,1025	61,7267
Mode28	74,7201	73,2371	72,4555	71,7069	70,8817	69,911	69,911	69,6454	69,2478	63,3871
Mode29	84,0329	74,0475	73,6725	73,044	72,2971	71,6217	71,6217	71,562	71,4114	68,5236
Mode30	84,0501	81,5406	81,2841	80,5484	79,8175	79,24	79,24	78,211	75,9732	70,9424
Mode31	85,4183	82,8501	82,3156	81,3811	80,4124	79,5676	79,5676	79,2842	79,0329	71,1643
Mode32	85,4999	82,9916	82,6907	82,221	81,5269	81,3379	81,3379	81,2265	80,3829	77,102
Mode33	85,8501	84,0926	83,6881	83,173	82,6253	81,8296	81,8296	81,3204	81,1141	78,3506
Mode34	86,631	84,5922	84,1218	83,6858	83,3566	83,3768	83,3768	83,2194	81,5418	79,1231
Mode35	89,5163	85,5355	85,5775	85,54	85,5217	84,5237	84,5237	83,3148	82,9707	81,616
Mode36	91,179	86,2631	86,142	86,0312	85,7154	85,5397	85,5397	85,4984	85,4586	83,8346
Mode37	91,1812	87,4629	87,4165	87,395	87,2944	87,2968	87,2968	87,2154	86,8685	85,1491
Mode38	99,7846	96,6492	95,9839	95,2703	93,9528	92,0653	92,0653	91,7889	91,7471	85,4617
Mode39	105,96	98,8042	98,5615	97,8063	96,9278	96,4017	96,4017	96,2929	96,1228	91,4693
Mode40	106,931	99,9011	99,1671	98,8262	98,5609	98,9533	98,9533	98,4814	97,2912	91,7675

En general podemos decir que a medida que aumenta la grieta, los valores de frecuencias propias disminuyen, lo cual es algo esperado y sigue la línea teórica que nos dice que un sólido con fallo será siempre menos rígido que unos sin él. Siempre hay excepciones en nuestros resultados, algunas de ellas debido a la imprecisión del software, debido al mallado, al método de cálculo empleado, etc. Estas anomalías pueden ser objeto de estudio en futuros trabajos.

Vamos a mostrar en un gráfico la variación de la frecuencia con respecto a los modos de vibración de la grieta radial, según los datos obtenidos con las tablas anteriores.

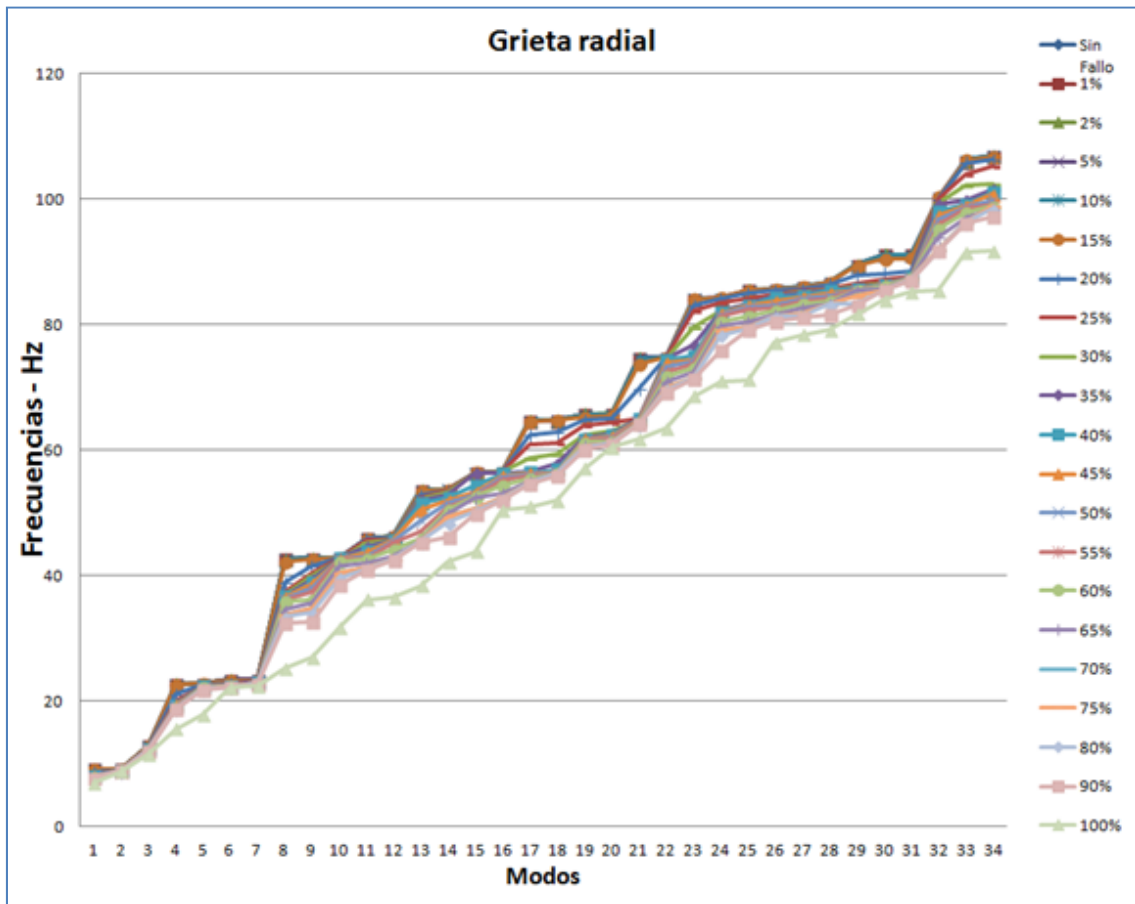


Figura 10.3. Frecuencias vs Modos en la grieta radial.

Cabe destacar dos aspectos que podemos observar en esta figura, uno que a partir del 10% de avance de grieta, las diferencias con la rueda sin fallo se disparan, y otra que, como observamos para algunos modos la diferencia es mayor que para otros sin seguir una regla lineal, y esto será comentado posteriormente en los resultados.

10.3.1. DIFERENCIAS UNITARIAS EN LA GRIETA RADIAL

A continuación mostraremos una serie de tablas en las que podremos ver las diferencias unitarias entre las frecuencias propias de vibración de la rueda sin fallo y las frecuencias de la rueda con grieta radial para cada uno de los porcentajes de avance de la grieta.

Tabla 10.4.1. Diferencias unitarias grieta radial. (1%-40%)

	Grieta Radial											
	1%	2%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%		
Mode7	-0,00366	-0,00151	0,00046	0,05709	0,51478	0,93006	1,04398	1,09522	1,13287	1,16289		
Mode8	-0,00404	-0,00029	-0,00081	0,03779	0,17024	0,24504	0,25391	0,25968	0,26866	0,26975		
Mode9	-0,0137	-0,0106	-0,0204	0,0074	0,1999	0,3566	0,398	0,3966	0,4163	0,429		
Mode10	-0,0376	-0,0313	-0,0482	0,023	1,6095	2,7401	3,0204	3,1389	3,2458	3,3172		
Mode11	-0,0211	-0,0128	-0,025	0,0048	0,1609	0,3733	0,4086	0,44	0,4629	0,4905		
Mode12	-0,0025	-0,0024	0,0161	0,1885	0,4521	0,6244	0,7778	0,8503	0,9554	0,9694		
Mode13	-0,0034	-0,0022	0,01	0,1243	0,3889	0,4329	0,4591	0,4307	0,4446	0,4461		
Mode14	-0,0251	-0,049	-0,0393	0,4768	3,6621	5,258	5,6499	5,8426	6,0126	6,1392		
Mode15	-0,0042	-0,0028	0,023	0,2676	1,2897	2,2636	2,7842	3,3395	3,8031	4,172		
Mode16	-0,0038	-0,0024	0,0215	0,0372	0,0207	0,0409	0,0842	0,0526	0,101	0,0856		
Mode17	-0,0431	-0,0632	-0,0342	-0,012	0,1235	0,2052	0,7549	1,3251	1,9421	2,2865		
Mode18	-0,0233	-0,049	-0,0304	0,0034	0,2179	0,4308	0,5156	0,4783	0,5591	0,61		
Mode19	-0,0776	-0,0669	-0,1338	-0,0089	0,6595	1,066	1,3089	1,4789	1,9618	2,9648		
Mode20	-0,0056	-0,0605	-0,0587	-0,0159	0,0789	0,1826	0,4855	0,814	1,3042	1,6323		
Mode21	-0,0551	-0,0258	-0,0607	-0,0523	-0,0528	-0,0592	-0,0661	0,1	1,9752	3,0406		
Mode22	-0,0611	-0,0335	-0,0625	-0,0631	-0,0615	-0,0463	0,0025	0,088	0,26	0,4649		
Mode23	-0,0393	-0,0825	-0,0607	0,0825	2,3094	3,6598	5,8367	8,2021	8,235	8,274		
Mode24	-0,066	-0,1424	-0,0697	0	1,8291	3,6491	5,2552	6,9099	7,893	8,2919		
Mode25	-0,0061	-0,003	0,0387	0,4972	0,8985	1,7455	3,3381	3,7783	3,9441	4,0583		
Mode26	-0,0076	-0,0057	0,0388	0,3688	0,7776	1,3097	2,6906	3,0937	3,4164	3,5947		
Mode27	-0,0454	-0,0165	0,0437	1,0365	5,0047	9,7258	9,8675	9,7568	9,8307	9,9055		
Mode28	-0,0361	-0,0224	-0,0318	-0,0391	-0,0311	-0,0178	0,0396	0,1415	0,3389	0,7432		
Mode29	-0,0591	-0,1697	-0,1149	0,0085	0,9738	1,7703	4,3971	7,3771	9,009	9,6189		
Mode30	-0,1247	-0,1992	-0,1295	-0,2112	0,0168	0,5761	1,9031	1,9123	2,0424	2,2189		
Mode31	-0,1071	-0,0818	-0,1259	-0,0798	0,4361	1,335	2,1786	2,246	2,3402	2,4109		
Mode32	-0,1245	-0,0658	-0,1165	-0,1116	-0,016	0,7937	0,9855	0,8812	1,1704	1,7918		
Mode33	-0,0877	-0,2118	-0,1671	-0,0945	0,2372	0,3395	0,5449	0,9074	1,2492	1,4371		
Mode34	-0,0622	-0,0677	-0,1687	-0,1165	0,2189	1,0695	1,1272	1,1168	1,2286	1,5832		
Mode35	-0,0204	-0,0181	-0,0108	0,2353	1,6708	3,0245	3,3658	3,6402	3,9545	3,9679		
Mode36	-0,0076	-0,0067	0,0496	0,7067	3,029	4,0306	4,6472	4,7975	4,9302	4,9547		
Mode37	-0,0196	-0,0112	0,0481	0,6627	2,656	3,4946	3,6753	3,6707	3,6976	3,7108		
Mode38	-0,0954	-0,5434	-0,2884	-0,5054	-0,1238	-0,2334	0,4191	0,5582	1,764	2,4704		
Mode39	-0,185	-0,311	-0,247	-0,227	0,192	2,001	3,787	6,2166	6,8742	7,0207		
Mode40	-0,104	-0,058	-0,066	0,122	0,629	1,691	4,51	5,311	5,774	6,149		

Tabla 10.4.2. Diferencias unitarias grieta radial. (45%-100%)

Grieta Radial										
	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	100%	
Mode7	1,20828	1,25122	1,30496	1,35654	1,3859	1,3859	1,40479	1,47455	2,27225	
Mode8	0,27354	0,26423	0,27901	0,28433	0,28546	0,28546	0,29088	0,31155	0,41809	
Mode9	0,4638	0,5091	0,5672	0,6463	0,6911	0,6911	0,7144	0,7827	1,398	
Mode10	3,4279	3,5314	3,6554	3,7776	3,8638	3,8638	3,9257	4,0526	7,1105	
Mode11	0,538	0,5383	0,6665	0,7908	0,8615	0,8615	0,9028	1,0519	4,9315	
Mode12	0,9888	0,9917	1,021	1,0464	1,0783	1,0783	1,0901	1,115	1,2915	
Mode13	0,4622	0,476	0,5106	0,5565	0,5769	0,5769	0,6155	0,6585	1,0241	
Mode14	6,2931	6,4776	6,7278	8,118	8,9346	8,9346	9,2403	10,3131	17,4644	
Mode15	4,7261	5,318	6,6361	7,2196	7,963	7,963	8,6689	10,1891	15,8014	
Mode16	0,0986	0,1583	0,6464	1,1565	2,4145	2,4145	3,1486	4,3651	11,0857	
Mode17	2,7407	3,2018	3,3159	3,888	4,4928	4,4928	4,6919	5,0901	9,7665	
Mode18	0,7339	0,9956	1,9806	3,2328	3,4764	3,4764	3,5655	3,8157	9,7122	
Mode19	4,7971	6,5338	7,6867	8,0039	8,0117	8,0117	8,1444	8,3443	15,1919	
Mode20	2,1497	2,6706	3,2572	3,7618	4,2966	4,2966	5,275	7,5912	11,4582	
Mode21	3,4575	3,6306	3,7852	3,933	5,6114	5,6114	6,1181	6,6441	12,5556	
Mode22	0,792	1,268	2,079	3,3223	4,1292	4,1292	4,2348	4,4952	5,9932	
Mode23	8,656	8,8581	9,2165	9,5992	9,8229	9,8229	9,8779	10,035	13,7437	
Mode24	8,3132	8,3044	8,3261	8,352	8,3802	8,3802	8,4079	8,7419	12,7787	
Mode25	4,196	4,3034	4,5228	4,9687	5,1286	5,1286	5,3614	5,7203	8,7212	
Mode26	3,8669	4,0604	4,4478	4,6573	4,7367	4,7367	4,7508	4,8151	5,3664	
Mode27	10,0252	10,1551	10,3343	10,5555	10,4598	10,4598	10,5871	10,5951	12,9709	
Mode28	1,483	2,2646	3,0132	3,8384	4,8091	4,8091	5,0747	5,4773	11,333	
Mode29	9,9854	10,3604	10,9889	11,7358	12,4112	12,4112	12,4709	12,6215	15,5093	
Mode30	2,5101	2,766	3,5023	4,2632	4,8107	4,8107	5,7737	8,0775	13,1083	
Mode31	2,5682	3,1027	4,0372	5,0059	5,8507	5,8507	6,1341	6,3854	14,254	
Mode32	2,5083	2,8092	3,2789	3,973	4,162	4,162	4,2734	5,117	8,3979	
Mode33	1,7575	2,162	2,6771	3,2248	4,0205	4,0205	4,5297	4,736	7,4995	
Mode34	2,0388	2,5092	2,9452	3,2744	3,2542	3,2542	3,4116	5,0892	7,5079	
Mode35	3,9808	3,9388	3,9763	3,9946	4,9926	4,9926	6,2015	6,5456	7,9003	
Mode36	4,9159	5,037	5,1478	5,4636	5,6393	5,6393	5,6806	5,7204	7,3444	
Mode37	3,7183	3,7647	3,7862	3,8868	3,8844	3,8844	3,9658	4,3127	6,0321	
Mode38	3,1354	3,8007	4,5143	5,8318	7,7193	7,7193	7,9957	8,0375	14,3229	
Mode39	7,1558	7,3985	8,1537	9,0322	9,5583	9,5583	9,6671	9,8372	14,4907	
Mode40	7,0299	7,7639	8,1048	8,3701	7,9777	7,9777	8,4496	9,6398	15,1635	

De estas tablas podemos extraer que la diferencia máxima unitaria para la grieta radial se produce en modo 14 para el 100% de avance de grieta, con un valor de 17,4644. En general podemos ver que a medida que la grieta se hace más profunda, las diferencias aumentan con respecto a los valores de la rueda sin fallo. Otras diferencias altas se dan en el modo 15 y avance 100% (15,8014), en el modo 19 y avance 100% (15,1919) y en el modo 29 y avance 100% (15,5093).

A continuación se puede ver esto en forma de tabla:

Tabla 10.5.1. Media de las diferencias unitarias según el avance de grieta radial.

Grieta Radial																		
1%	2%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	100%
-0,0466	-0,0716	-0,0536	0,1003	0,8865	1,6179	2,2485	2,6661	3,0158	3,2554	3,5587	3,8581	4,2674	4,7377	5,1674	5,1674	5,4307	5,9353	9,5271

Tabla 10.5.2. Media de las diferencias unitarias para cada modo.

Grieta Radial		Grieta Radial	
modo 7	0,99876684	modo 24	5,97551053
modo 8	0,22051947	modo 25	3,49161053
modo 9	0,45383158	modo 26	2,98500526
modo 10	2,85192105	modo 27	7,96063684
modo 11	0,70657368	modo 28	2,27301579
modo 12	0,76474737	modo 29	7,43713684
modo 13	0,43095789	modo 30	3,03302632
modo 14	6,07533158	modo 31	3,35479474
modo 15	4,86425789	modo 32	2,30894211
modo 16	1,36451053	modo 33	2,04114737
modo 17	2,53501579	modo 34	2,06388421
modo 18	1,77376316	modo 35	3,4912
modo 19	4,41464211	modo 36	4,0905
modo 20	2,58493158	modo 37	3,09581053
modo 21	2,95214211	modo 38	3,49993684
modo 22	1,62791053	modo 39	5,78806842
modo 23	6,63206316	modo 40	5,49657895

Vemos que los modos cuya diferencia media más alta son el 27, 29, 23, 14, por lo que estos serán modos muy tenidos en cuenta a la hora de elaborar las conclusiones.

10.3.2. DIFERENCIAS PORCENTUALES EN LA GRIETA RADIAL

A continuación expondremos los resultados de la grieta radial pero con diferencias porcentuales en vez de unitarias.

Tabla 10.6.1. Diferencias porcentuales grieta radial. (1%-40%)

Grieta Radial											
	1%	2%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	
Mode7	-0,040	-0,017	0,005	0,625	5,639	10,188	11,436	11,998	12,410	12,739	
Mode8	-0,044	-0,032	-0,009	0,413	1,862	2,680	2,777	2,840	2,938	2,950	
Mode9	-0,107	-0,083	-0,159	0,058	1,557	2,778	3,100	3,089	3,243	3,342	
Mode10	-0,166	-0,138	-0,213	0,102	7,107	12,099	13,337	13,860	14,332	14,648	
Mode11	-0,093	-0,056	-0,110	0,021	0,707	1,640	1,795	1,933	2,034	2,155	
Mode12	-0,011	-0,010	0,069	0,807	1,934	2,672	3,328	3,638	4,088	4,148	
Mode13	-0,015	-0,009	0,043	0,532	1,664	1,852	1,964	1,843	1,902	1,908	
Mode14	-0,059	-0,115	-0,092	1,118	8,589	12,332	13,251	13,703	14,101	14,398	
Mode15	-0,010	-0,007	0,054	0,626	3,015	5,292	6,508	7,807	8,890	9,753	
Mode16	-0,009	-0,006	0,050	0,087	0,048	0,096	0,197	0,123	0,236	0,200	
Mode17	-0,094	-0,138	-0,075	-0,026	0,269	0,447	1,045	2,888	4,232	4,983	
Mode18	-0,050	-0,106	-0,066	0,007	0,472	0,933	1,116	1,036	1,211	1,321	
Mode19	-0,145	-0,125	-0,250	-0,017	1,233	1,993	2,447	2,765	3,668	5,544	
Mode20	-0,010	-0,113	-0,109	-0,030	0,147	0,340	0,905	1,517	2,431	3,042	
Mode21	-0,098	-0,046	-0,108	-0,093	-0,094	-0,105	-0,117	0,178	3,506	5,398	
Mode22	-0,108	-0,059	-0,111	-0,112	-0,109	-0,082	0,004	0,156	0,461	0,824	
Mode23	-0,061	-0,128	-0,094	0,128	3,573	5,662	9,029	12,688	12,739	12,800	
Mode24	-0,102	-0,220	-0,108	0,000	2,827	5,640	8,122	10,680	12,199	12,815	
Mode25	-0,009	-0,005	0,059	0,756	1,367	2,655	5,078	5,748	6,000	6,174	
Mode26	-0,012	-0,009	0,059	0,561	1,182	1,992	4,092	4,705	5,195	5,466	
Mode27	-0,061	-0,022	0,059	1,388	6,700	13,020	13,210	13,062	13,161	13,261	
Mode28	-0,048	-0,030	-0,043	-0,052	-0,042	-0,024	0,053	0,189	0,454	0,995	
Mode29	-0,070	-0,202	-0,137	0,010	1,159	2,107	5,233	8,779	10,721	11,447	
Mode30	-0,148	-0,237	-0,154	-0,251	0,020	0,685	2,264	2,275	2,430	2,640	
Mode31	0,125	0,096	0,147	0,093	0,511	1,563	2,551	2,629	2,740	2,822	
Mode32	-0,146	-0,077	-0,136	-0,131	-0,019	0,928	1,153	1,031	1,369	2,096	
Mode33	-0,102	-0,247	-0,195	-0,110	0,276	0,395	0,635	1,057	1,455	1,674	
Mode34	-0,072	-0,078	-0,195	-0,134	0,253	1,235	1,301	1,289	1,418	1,828	
Mode35	-0,023	-0,020	-0,012	0,263	1,866	3,379	3,760	4,067	4,418	4,433	
Mode36	-0,008	-0,007	0,054	0,775	3,322	4,421	5,097	5,262	5,407	5,434	
Mode37	-0,021	-0,012	0,053	0,727	2,913	3,833	4,031	4,026	4,055	4,070	
Mode38	-0,096	-0,545	-0,289	-0,506	-0,124	-0,234	0,120	0,559	1,768	2,176	
Mode39	-0,175	-0,294	-0,233	-0,214	0,181	1,888	3,574	5,867	6,488	6,626	
Mode40	-0,097	-0,054	-0,062	0,114	0,588	1,581	4,218	4,967	5,400	5,750	

Tabla 10.6.2. Diferencias porcentuales grieta radial. (45%- 100%)

Grieta Radial										
	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	100%	
Mode7	13,2360	13,7064	14,2951	14,8602	15,1818	15,1818	15,3887	16,1529	24,8912	
Mode8	2,9917	2,8899	3,0515	3,1097	3,1221	3,1221	3,1814	3,4074	4,5727	
Mode9	3,6127	3,9656	4,4181	5,0343	5,3832	5,3832	5,5647	6,0967	10,8895	
Mode10	15,1364	15,5934	16,1409	16,6805	17,0611	17,0611	17,3345	17,8948	31,3974	
Mode11	2,3638	2,3652	2,9284	3,4746	3,7852	3,7852	3,9667	4,6218	21,6678	
Mode12	4,2307	4,2431	4,3685	4,4772	4,6136	4,6136	4,6641	4,7707	5,5258	
Mode13	1,9774	2,0364	2,1814	2,3808	2,4681	2,4681	2,6332	2,8172	4,3813	
Mode14	14,7593	15,1920	15,7788	19,0393	20,9545	20,9545	21,6715	24,1875	40,9596	
Mode15	11,0480	12,4316	15,5129	16,8769	18,6147	18,6147	20,2649	23,8186	36,9381	
Mode16	0,2305	0,3700	1,5110	2,7033	5,6440	5,6440	7,3599	10,2035	25,9131	
Mode17	5,9724	6,9772	7,2259	8,4726	9,7905	9,7905	10,2244	11,0921	21,2827	
Mode18	1,5892	2,1559	4,2888	7,0003	7,5278	7,5278	7,7208	8,2625	21,0309	
Mode19	8,9698	12,2111	14,3728	14,9659	14,9805	14,9805	15,2286	15,6024	28,4063	
Mode20	4,0067	4,9776	6,0709	7,0114	8,0082	8,0082	9,8318	14,1488	21,3563	
Mode21	6,1376	6,4448	6,7193	6,9816	9,9611	9,9611	10,8605	11,7942	22,2880	
Mode22	1,4031	2,2463	3,6831	5,8857	7,3151	7,3151	7,5077	7,9635	10,6173	
Mode23	13,3906	13,7032	14,2576	14,7878	15,1957	15,1957	15,2808	15,5238	21,2611	
Mode24	12,8484	12,8348	12,8683	12,9083	12,9519	12,9519	12,9947	13,5109	19,7500	
Mode25	6,3833	6,5467	6,8814	7,5588	7,8020	7,8020	8,1562	8,7077	13,7674	
Mode26	5,8803	6,1746	6,7637	7,0823	7,2030	7,2030	7,2245	7,3222	8,1606	
Mode27	13,4210	13,5949	13,8348	14,1310	14,0029	14,0029	14,1733	14,1840	17,3645	
Mode28	1,9847	3,0308	4,0326	5,1370	6,4362	6,4362	6,7916	7,3304	15,1673	
Mode29	11,8827	12,3290	13,0769	13,9657	14,7695	14,7695	14,8405	15,0197	18,4562	
Mode30	2,9864	3,2909	4,1669	5,0722	5,7236	5,7236	6,8693	9,6103	15,5957	
Mode31	3,0066	3,6324	4,7284	5,8605	6,8495	6,8495	7,1812	7,4754	16,6873	
Mode32	2,9337	3,2856	3,8350	4,6468	4,8678	4,8678	4,9981	5,9848	9,8221	
Mode33	2,0472	2,5183	3,1183	3,7563	4,6832	4,6832	5,2763	5,5166	8,7356	
Mode34	2,3534	2,8964	3,3997	3,7797	3,7564	3,7564	3,9381	5,8746	8,6665	
Mode35	4,4470	4,4001	4,4420	4,4624	5,5773	5,5773	6,9278	7,3122	8,8255	
Mode36	5,3915	5,5243	5,6458	5,9922	6,1849	6,1849	6,2302	6,2738	8,0549	
Mode37	4,0779	4,1288	4,1524	4,2627	4,2601	4,2601	4,3494	4,7298	6,6155	
Mode38	3,1422	3,8089	4,5240	5,8444	7,7360	7,7360	8,0130	8,0549	14,3538	
Mode39	6,7533	6,9824	7,6451	8,5247	9,0707	9,0707	9,1733	9,7839	13,6756	
Mode40	6,5742	7,2607	7,5795	7,8276	7,4606	7,4606	7,9019	9,0150	14,1806	

En el caso de las diferencias porcentuales podemos ver que la diferencia máxima para la grieta radial se produce en modo 14 para el 100% de avance de grieta, con un valor de 40,95. En general podemos ver que a medida que la grieta se hace más profunda, al igual que con las diferencias unitarias, las diferencias aumentan con respecto a los valores de la rueda sin fallo. Otras diferencias altas se dan en el modo 15 y avance 100% (36,94), en el modo 10 y avance 100% (31,39) y en el modo 19 y avance 100% (28,40).

10.3.3. Relación Frecuencia – Áreas para la Grieta Circunferencial.

Es un punto importante del proyecto pues a través de él determinaremos los modos más fiables a la hora de analizar los resultados. Vamos a relacionar las frecuencias obtenidas en una determinada posición con las áreas de grieta de dicha posición, pudiendo luego mostrar las líneas de tendencia de las frecuencias para cada modo. Con esto podemos definir una línea para cada modo y obtener su R^2 , que determinará si esos modos son muy aproximados a la línea de tendencia o no, y por consiguiente si dichos modos pueden ser fiables o no a la hora de predecir los fallos de la rueda.

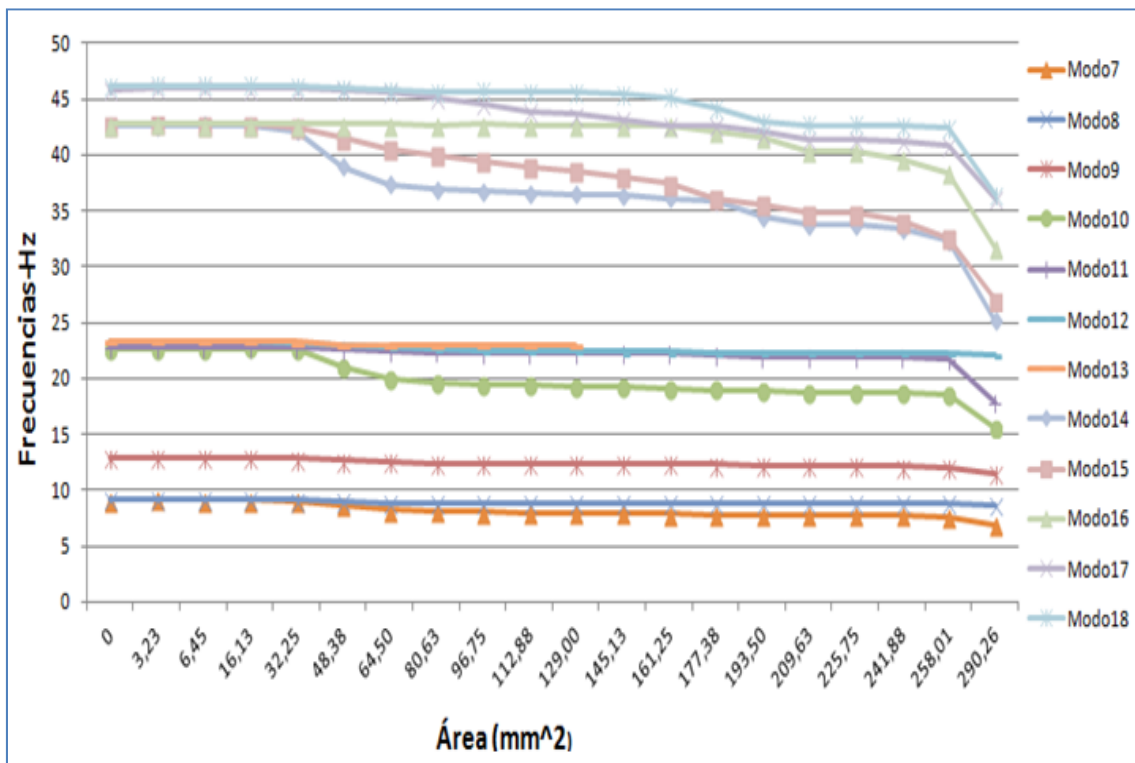


Figura 10.3.1. Frecuencias-Área para Grieta Radial, modos 7-18.

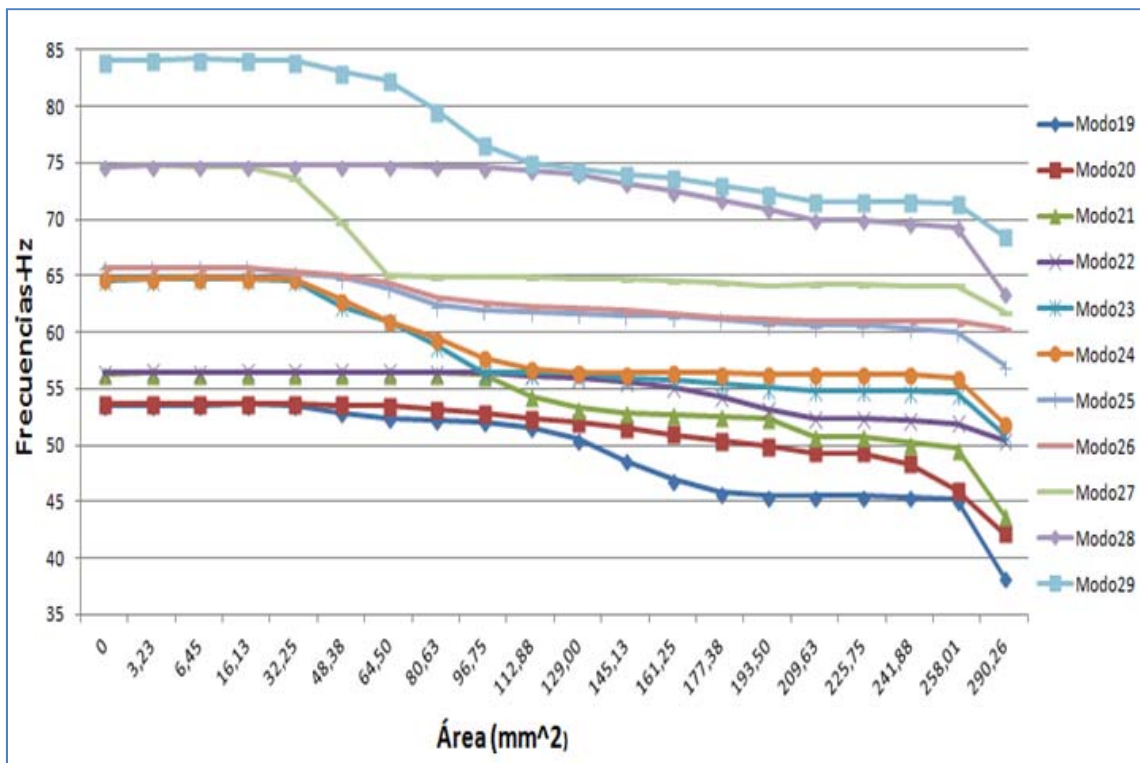


Figura 10.3.2. Frecuencias-Área para Grieta Radial, modos 19-29.

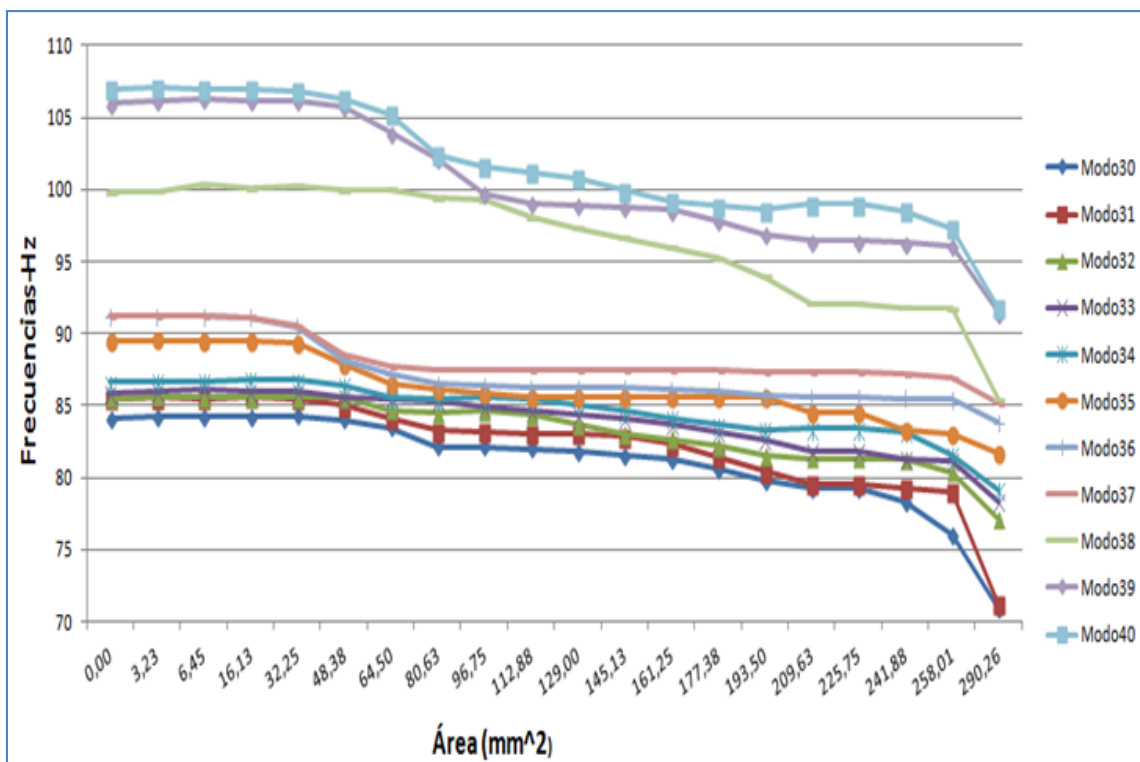


Figura 10.3.3. Frecuencias-Área para Grieta Radial, modos 30-40.

Se ha calculado la siguiente tabla mediante una hoja de cálculo al introducir los datos anteriormente expuestos en la figura 10.3.1, 10.3.2 y 10.3.3, obteniendo las líneas de tendencia de la relación frecuencia-área de la grieta y los R² de dichas líneas de tendencia.

Tabla 10.6.3. 'Funciones' y 'R-cuadrado' de cada modo para 'Grieta Radial'.

Grieta Radial		
Modo	Función	R ²
7	$y = -0,151x + 9,4955$	0,877
8	$y = -0,0359x + 9,2223$	0,865
9	$y = -0,057x + 12,984$	0,858
10	$y = -0,4371x + 23,726$	0,861
11	$y = -0,0635x + 22,933$	0,872
12	$y = -0,12x + 23,653$	0,936
13	$y = -0,0593x + 23,482$	0,826
14	$y = -0,8062x + 44,482$	0,865
15	$y = -0,4876x + 44,073$	0,921
16	$y = -0,0104x + 42,803$	0,849
17	$y = -0,2303x + 46,682$	0,771
18	$y = -0,0771x + 46,397$	0,875
19	$y = -0,2871x + 54,371$	0,862
20	$y = -0,1574x + 54,201$	0,760
21	$y = -0,2153x + 57,194$	0,458
22	$y = -0,0375x + 56,628$	0,535
23	$y = -1,0427x + 67,588$	0,881
24	$y = -0,9886x + 67,584$	0,890
25	$y = -0,5026x + 67,087$	0,892
26	$y = -0,4292x + 66,946$	0,895
27	$y = -1,3335x + 77,689$	0,843
28	$y = -0,0534x + 74,942$	0,534
29	$y = -1,0708x + 87,475$	0,821
30	$y = -0,2814x + 85,011$	0,792
31	$y = -0,3168x + 86,36$	0,851
32	$y = -0,1826x + 86,124$	0,805
33	$y = -0,1614x + 86,441$	0,833
34	$y = -0,1855x + 87,205$	0,827
35	$y = -0,5114x + 90,784$	0,891
36	$y = -0,2253x + 100,83$	0,597
37	$y = -0,6496x + 92,61$	0,885
38	$y = -0,8474x + 108,76$	0,819
39	$y = -0,496x + 92,195$	0,852
40	$y = -0,7371x + 109,18$	0,844

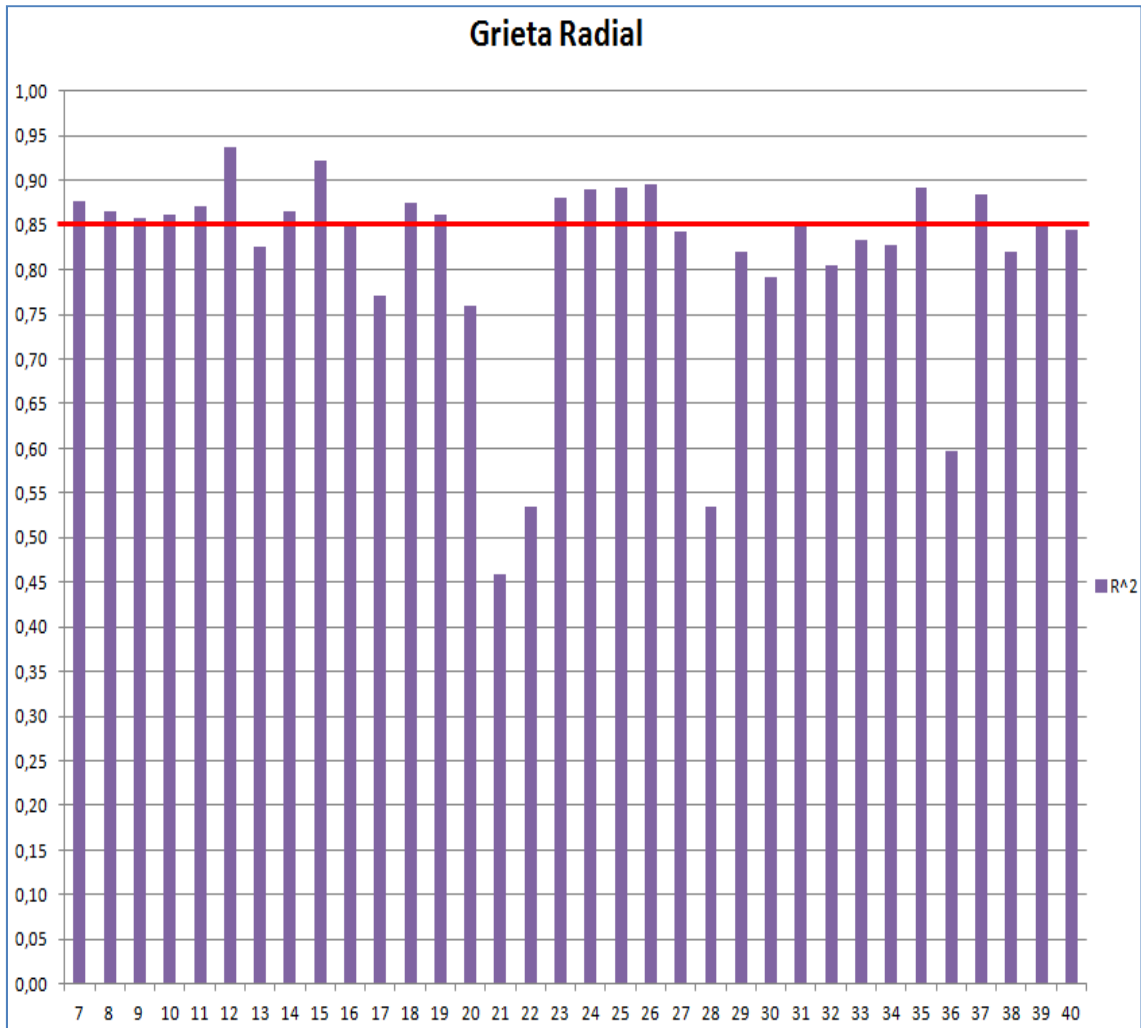


Figura 10.3.4. 'R-cuadrado' para cada modo en Grieta Radial.

Con este gráfico podemos decir que los valores R^2 mayores de 0,85 son los que consideramos suficientemente fiables a la hora de sacar conclusiones. Por lo tanto los modos que tienen un R^2 superior a 0,85 son el modo 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 18, 19, 23, 24, 25, 26, 35 y 37.

Este gráfico lo hemos obtenido mediante la extracción de los datos de la tabla 10.6.3 para tener una visión gráfica del R^2 de cada modo en la grieta radial.

10.4. RESULTADOS EN LOS ANÁLISIS DE LA GRIETA CIRCUNFERENCIAL

A continuación presentaremos las tablas de resultados para la grieta circunferencial, en este caso tendremos 140 grietas por lo que trataremos de presentar los resultados de forma clara. Seguiremos el orden establecido con la grieta radial, para así facilitar al lector la comprensión de los resultados.

10.4.1. Resultados para Profundidad de grieta 25%

Tabla 10.7. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 1', Profundidad 25%.

GRIETA CIRCUNFERENCIAL												
SIN FALLO	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%		
Mode7	9,1287	9,1340	9,1300	9,1332	9,1313	9,1308	9,1217	9,1061	9,1017	9,0969	9,0964	
Mode8	9,1433	9,1490	9,1452	9,1469	9,1434	9,1405	9,1347	9,1318	9,1295	9,1248	9,1197	
Mode9	12,8380	12,8571	12,8435	12,8455	12,8279	12,7872	12,7269	12,6357	12,6000	12,5715	12,5358	
Mode10	22,6468	22,7120	22,6812	22,7032	22,6945	22,5895	22,4620	22,3636	22,3257	22,3045	22,2743	
Mode11	22,7596	22,7903	22,7594	22,7603	22,7208	22,7143	22,6643	22,5210	22,4521	22,3854	22,3096	
Mode12	23,3720	23,3767	23,3744	23,3771	23,3752	23,3759	23,3725	23,3706	23,3699	23,3661	23,3669	
Mode13	23,3746	23,3780	23,3770	23,3792	23,3760	23,3804	23,3778	23,3744	23,3732	23,3700	23,3692	
Mode14	42,6381	42,7063	42,6737	42,7125	42,6835	42,6324	42,5783	42,5039	42,4506	42,4224	42,3890	
Mode15	42,7780	42,7826	42,7809	42,7858	42,7801	42,7837	42,7827	42,7823	42,7842	42,7789	42,7806	
Mode16	42,7803	42,7842	42,7842	42,7870	42,7826	42,7870	42,7856	42,7844	42,7856	42,7818	42,7823	
Mode17	45,8893	45,9671	45,9493	45,9495	45,9729	45,9633	45,9682	46,0007	45,9689	45,9558	45,9462	
Mode18	46,1807	46,2531	46,2147	46,2867	46,2780	46,2911	46,2521	46,2556	46,2375	46,2236	46,2291	
Mode19	53,4808	53,6049	53,5679	53,6093	53,5282	53,3168	53,1135	52,9507	52,8803	52,8426	52,8174	
Mode20	53,6526	53,6919	53,6380	53,6738	53,6237	53,6147	53,5306	53,2732	53,1244	53,0117	52,8645	
Mode21	56,3334	56,3906	56,3464	56,3641	56,3325	56,3205	56,3101	56,2808	56,2652	56,2057	56,1903	
Mode22	56,4473	56,5181	56,4822	56,5013	56,4987	56,4954	56,4469	56,3768	56,3671	56,3223	56,3170	
Mode23	64,6425	64,7461	64,7132	64,7893	64,7763	64,7335	64,7242	64,7545	64,6864	64,6472	64,6537	
Mode24	64,7024	64,8458	64,8126	64,8335	64,8297	64,8649	64,8322	64,8051	64,7947	64,7523	64,7341	
Mode25	65,7342	65,7400	65,7388	65,7473	65,7346	65,7408	65,7418	65,7427	65,7481	65,7368	65,7375	
Mode26	65,7599	65,7657	65,7661	65,7740	65,7617	65,7682	65,7716	65,7670	65,7718	65,7660	65,7684	
Mode27	74,6976	74,7443	74,7178	74,7281	74,7210	74,7246	74,7126	74,6955	74,6952	74,6768	74,6803	
Mode28	74,7201	74,7665	74,7396	74,7580	74,7529	74,7612	74,7546	74,7427	74,7374	74,7032	74,7045	
Mode29	84,0329	84,2195	84,1554	84,2239	84,2103	84,1858	84,1957	84,1828	84,1826	84,0738	84,0712	
Mode30	84,0507	84,2471	84,2206	84,2946	84,2306	84,2735	84,2582	84,2382	84,2042	84,0897	84,1230	
Mode31	85,4183	85,5530	85,4949	85,5310	85,5180	85,5563	85,5151	85,2450	85,1023	85,0428	85,0326	
Mode32	85,4999	85,6322	85,5534	85,6110	85,5821	85,5585	85,5576	85,4293	85,4032	85,3154	85,3150	
Mode33	85,8501	85,9539	85,9325	86,0208	85,9724	85,8593	85,5991	85,5400	85,5229	85,4521	85,4376	
Mode34	86,6310	86,7466	86,7411	86,7521	86,6845	86,5435	86,4893	86,4585	86,4150	86,3131	86,2269	
Mode35	89,5163	89,5492	89,5368	89,5457	89,5423	89,5070	89,4603	89,3813	89,3415	89,3104	89,2695	
Mode36	91,1790	91,1835	91,1867	91,1991	91,1738	91,1828	91,1924	91,1899	91,2015	91,1818	91,1815	
Mode37	91,1812	91,1974	91,1929	91,2206	91,1816	91,1957	91,2070	91,1947	91,2105	91,1929	91,1961	
Mode38	99,7846	99,9970	100,1690	100,2050	100,2680	100,1820	100,0440	100,2510	100,0290	100,0460	100,0260	
Mode39	105,9600	106,2890	106,2030	106,3450	106,2350	106,2760	106,3440	106,2830	106,3540	106,0800	106,1620	
Mode40	106,9310	107,0630	106,9950	107,0330	107,0200	107,0300	107,0120	106,9860	106,9910	106,9320	106,9420	

Tabla 10.8. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 2', Profundidad 25%.

	GRIETA CIRCUNFERENCIAL											
	SIN FALLO	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%	
Mode7	9,1287	9,1319	9,1319	9,1309	9,1305	9,1276	9,1239	9,1171	9,1167	9,1146	9,1124	
Mode8	9,1433	9,1463	9,1463	9,1473	9,1461	9,1458	9,1415	9,1350	9,1361	9,1321	9,1295	
Mode9	12,8380	12,8497	12,8497	12,8434	12,8379	12,8266	12,8074	12,7696	12,7675	12,7471	12,7341	
Mode10	22,6468	22,6807	22,6807	22,6590	22,6708	22,6805	22,6186	22,5583	22,5625	22,5139	22,4632	
Mode11	22,7596	22,7706	22,7706	22,7811	22,7489	22,6911	22,6681	22,5903	22,5742	22,5322	22,5333	
Mode12	23,3720	23,3751	23,3751	23,3741	23,3749	23,3735	23,3734	23,3698	23,3700	23,3678	23,3673	
Mode13	23,3746	23,3779	23,3779	23,3784	23,3773	23,3780	23,3746	23,3720	23,3734	23,3739	23,3710	
Mode14	42,6381	42,6869	42,6869	42,6948	42,6854	42,6859	42,7059	42,6795	42,7357	42,6844	42,6948	
Mode15	42,7780	42,7824	42,7824	42,7828	42,7821	42,7827	42,7820	42,7796	42,7809	42,7823	42,7801	
Mode16	42,7803	42,7844	42,7844	42,7832	42,7832	42,7832	42,7825	42,7815	42,7836	42,7839	42,7808	
Mode17	45,8893	45,9519	45,9519	45,9593	45,9700	45,9663	45,9383	45,9156	45,9771	45,9089	45,9396	
Mode18	46,1807	46,2311	46,2311	46,2222	46,2203	46,2208	46,2498	46,2554	46,2752	46,1985	46,1949	
Mode19	53,4808	53,5773	53,5773	53,5218	53,5442	53,5587	53,5351	53,4506	53,4650	53,3951	53,3392	
Mode20	53,6526	53,6729	53,6729	53,7245	53,6444	53,5924	53,5676	53,4609	53,5356	53,4521	53,4686	
Mode21	56,3334	56,3616	56,3616	56,3625	56,3422	56,3417	56,3103	56,2693	56,2721	56,2357	56,2060	
Mode22	56,4473	56,4938	56,4938	56,4966	56,4940	56,4851	56,4359	56,3648	56,3742	56,3481	56,3247	
Mode23	64,6425	64,7283	64,7283	64,7154	64,7203	64,7187	64,7654	64,7378	64,8072	64,6773	64,7095	
Mode24	64,7024	64,8016	64,8016	64,7877	64,7938	64,8050	64,7806	64,7795	64,8439	64,7493	64,7545	
Mode25	65,7342	65,7413	65,7413	65,7395	65,7393	65,7416	65,7420	65,7411	65,7420	65,7476	65,7394	
Mode26	65,7599	65,7665	65,7665	65,7665	65,7637	65,7628	65,7639	65,7624	65,7679	65,7708	65,7656	
Mode27	74,6976	74,7233	74,7233	74,7230	74,7227	74,7252	74,7126	74,6780	74,6959	74,6856	74,6680	
Mode28	74,7201	74,7482	74,7482	74,7496	74,7512	74,7552	74,7355	74,7168	74,7282	74,7082	74,7007	
Mode29	84,0329	84,1571	84,1571	84,1346	84,1517	84,1673	84,1513	84,1286	84,1935	84,0948	84,0550	
Mode30	84,0507	84,2088	84,2088	84,1861	84,1739	84,1805	84,2264	84,1790	84,3278	84,1210	84,2011	
Mode31	85,4183	85,5222	85,5222	85,5169	85,5188	85,5234	85,4500	85,2863	85,3225	85,1811	85,1715	
Mode32	85,4999	85,5841	85,5841	85,6000	85,5739	85,5519	85,5146	85,3278	85,3532	85,2872	85,2400	
Mode33	85,8501	86,0249	86,0249	85,9792	85,9262	85,8236	85,6518	85,4806	85,5514	85,4772	85,4135	
Mode34	86,6310	86,7283	86,7283	86,6795	86,6419	86,5822	86,5047	86,5475	86,5719	86,4874	86,3935	
Mode35	89,5163	89,5432	89,5432	89,5289	89,5158	89,4799	89,4224	89,3223	89,2955	89,2494	89,1901	
Mode36	91,1790	91,1899	91,1899	91,1847	91,1837	91,1843	91,1889	91,1842	91,1926	91,1949	91,1862	
Mode37	91,1812	91,1953	91,1953	91,1963	91,1887	91,1886	91,1925	91,1951	91,2016	91,2187	91,1953	
Mode38	99,7846	100,2800	100,2800	100,0310	100,0640	99,9931	99,9348	100,0260	100,2740	99,8044	99,8997	
Mode39	105,9600	106,2140	106,2140	106,1520	106,1810	106,2080	106,2450	106,2050	106,4010	106,1680	106,1780	
Mode40	106,9310	107,0130	107,0130	107,0220	107,0090	107,0130	106,9670	106,9020	106,9420	106,9170	106,8880	

Tabla 10.9. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 3', Profundidad 25%.

	GRIETA CIRCUNFERENCIAL											
	SIN FALLO	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%	
Mode7	9,1287	9,1322	9,1322	9,0719	9,0782	9,0697	9,0742	9,0630	9,0662	9,0621	9,0572	
Mode8	9,1433	9,1484	9,1484	9,0935	9,0973	9,0864	9,0897	9,0852	9,0840	9,0745	9,0807	
Mode9	12,8380	12,8454	12,8454	12,8099	12,8277	12,7958	12,8097	12,7814	12,7835	12,7746	12,7622	
Mode10	22,6468	22,6541	22,6541	22,6073	22,6715	22,5883	22,5899	22,5165	22,4988	22,4824	22,4438	
Mode11	22,7596	22,7734	22,7734	22,6997	22,6812	22,6125	22,6342	22,5333	22,5152	22,5094	22,4939	
Mode12	23,3720	23,3765	23,3765	23,1243	23,1326	23,1202	23,1285	23,1233	23,1284	23,1120	23,1231	
Mode13	23,3746	23,3787	23,3787	23,1295	23,1442	23,1274	23,1447	23,1317	23,1369	23,1226	23,1302	
Mode14	42,6381	42,6824	42,6824	42,2835	42,3199	42,2743	42,3073	42,3014	42,3125	42,2834	42,3038	
Mode15	42,7780	42,7827	42,7827	42,3154	42,3298	42,3088	42,3392	42,3333	42,3283	42,3003	42,3266	
Mode16	42,7803	42,7858	42,7858	42,6119	42,6652	42,6255	42,6452	42,6189	42,6184	42,6219	42,6394	
Mode17	45,8893	45,9128	45,9128	45,7710	45,8085	45,7238	45,7366	45,5280	45,5069	45,5368	45,5400	
Mode18	46,1807	46,2140	46,2140	46,0427	46,0385	45,9468	46,0041	45,9621	45,9458	45,9470	45,9335	
Mode19	53,4808	53,5380	53,5380	53,5769	53,7113	53,6076	53,6636	53,6182	53,6186	53,5991	53,6149	
Mode20	53,6526	53,7011	53,7011	53,6783	53,7414	53,6720	53,7189	53,6897	53,7158	53,6903	53,6928	
Mode21	56,3334	56,4203	56,4203	56,7456	56,7698	56,7060	56,7615	56,6921	56,6085	56,6190	56,5421	
Mode22	56,4473	56,5654	56,5654	56,8788	56,8913	56,8805	56,8665	56,9024	56,8098	56,7822	56,7155	
Mode23	64,6425	64,6714	64,6714	64,5051	64,5461	64,4019	64,4918	64,2935	64,3342	64,3528	64,3348	
Mode24	64,7024	64,7919	64,7919	64,5342	64,5906	64,5016	64,5874	64,4170	64,3906	64,3984	64,4190	
Mode25	65,7342	65,7414	65,7414	65,0017	65,0549	64,9967	65,0753	65,0505	65,0305	64,9831	65,0400	
Mode26	65,7599	65,7682	65,7682	65,0574	65,1073	65,0408	65,1210	65,1052	65,0998	65,0524	65,0808	
Mode27	74,6976	74,7425	74,7425	74,8403	74,8598	74,8489	74,8490	74,8829	74,8322	74,8016	74,7725	
Mode28	74,7201	74,7844	74,7844	74,9018	74,9180	74,9017	74,9429	74,9255	74,8550	74,8657	74,8351	
Mode29	84,0329	84,0779	84,0779	83,9093	84,0074	83,7989	83,9307	83,7357	83,7115	83,7326	83,7832	
Mode30	84,0507	84,2230	84,2230	83,9533	84,0482	83,9389	84,1444	83,7981	83,8445	83,8205	83,8175	
Mode31	85,4183	85,5620	85,5620	85,9566	86,1223	85,9557	86,0600	85,6363	85,5507	85,5874	85,5107	
Mode32	85,4999	85,6971	85,6971	86,2720	86,2526	86,0821	86,1661	86,0566	85,8390	85,8093	85,6398	
Mode33	85,8501	85,9473	85,9473	86,3860	86,4289	86,3132	86,3579	86,3581	86,1693	86,1316	86,0169	
Mode34	86,6310	86,7062	86,7062	86,8791	86,9975	86,8444	86,9067	86,8308	86,7712	86,7609	86,7447	
Mode35	89,5163	89,5912	89,5912	90,0026	89,9756	89,8798	89,8419	89,6403	89,5305	89,5285	89,3896	
Mode36	91,1790	91,1843	91,1843	90,2147	90,3173	90,1789	90,3558	90,3057	90,2699	90,1710	90,2606	
Mode37	91,1812	91,2042	91,2042	90,2462	90,3563	90,2374	90,4420	90,3845	90,3057	90,2414	90,3192	
Mode38	99,7846	100,0330	100,0330	100,3790	100,5300	100,0400	100,1610	99,4077	99,3478	99,4837	99,3265	
Mode39	105,9600	106,2200	106,2200	106,0080	106,1530	105,9490	106,2780	106,0100	105,8650	105,8200	105,9150	
Mode40	106,9310	107,0390	107,0390	107,8740	107,9160	107,8770	107,9100	107,7080	107,6550	107,6480	107,5770	

Tabla 10.10. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 4', Profundidad 25%.

		GRIETA CIRCUNFERENCIAL											
SIN FALLO		1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%		
Mode7	9,1287	9,1317	9,1320	9,1301	9,1298	9,1280	9,1250	9,1235	9,1268	9,1252	9,1246		
Mode8	9,1433	9,1444	9,1479	9,1436	9,1438	9,1413	9,1404	9,1376	9,1398	9,1396	9,1370		
Mode9	12,8380	12,8398	12,8584	12,8332	12,8397	12,8385	12,8342	12,8337	12,8588	12,8605	12,8511		
Mode10	22,6468	22,6827	22,6729	22,6598	22,6570	22,6693	22,6339	22,6163	22,6387	22,6388	22,6052		
Mode11	22,7596	22,7518	22,8056	22,7437	22,7532	22,7144	22,6922	22,6778	22,7084	22,7256	22,6933		
Mode12	23,3720	23,3746	23,3746	23,3741	23,3741	23,3736	23,3732	23,3733	23,3742	23,3738	23,3741		
Mode13	23,3746	23,3772	23,3778	23,3765	23,3756	23,3744	23,3744	23,3739	23,3760	23,3750	23,3756		
Mode14	42,6381	42,6618	42,6673	42,6074	42,5575	42,3966	42,2381	42,0534	42,0222	41,9697	41,8272		
Mode15	42,7780	42,7834	42,7823	42,7813	42,7815	42,7813	42,7816	42,7837	42,7846	42,7853	42,7870		
Mode16	42,7803	42,7841	42,7828	42,7826	42,7820	42,7835	42,7842	42,7849	42,7876	42,7855	42,7893		
Mode17	45,8893	45,9388	45,9384	45,9170	45,9169	45,8942	45,7198	45,5315	45,4828	45,4979	45,4498		
Mode18	46,1807	46,2436	46,1883	46,1740	46,1195	46,0462	45,9925	45,9913	45,9512	45,9491	45,7552		
Mode19	53,4808	53,5583	53,5632	53,5145	53,4715	53,2237	53,1039	52,9806	53,0520	53,0774	52,9092		
Mode20	53,6526	53,6065	53,6981	53,5377	53,5208	53,5048	53,3979	53,2313	53,2017	53,0884	52,9951		
Mode21	56,3334	56,3563	56,3706	56,3316	56,3481	56,3043	56,2623	56,2401	56,2858	56,2309	56,2741		
Mode22	56,4473	56,4824	56,5017	56,4726	56,4742	56,4399	56,4114	56,3668	56,3851	56,3610	56,3852		
Mode23	64,6425	64,7510	64,7044	64,6662	64,6363	64,5270	64,3240	64,2922	64,2510	64,2380	64,0678		
Mode24	64,7024	64,7901	64,7676	64,7104	64,6696	64,6454	64,5280	64,3279	64,2716	64,3038	64,1313		
Mode25	65,7342	65,7449	65,7403	65,7367	65,7379	65,7401	65,7376	65,7401	65,7449	65,7424	65,7482		
Mode26	65,7599	65,7696	65,7643	65,7628	65,7630	65,7640	65,7630	65,7658	65,7666	65,7653	65,7694		
Mode27	74,6976	74,7188	74,7335	74,7021	74,7087	74,6762	74,6556	74,6182	74,6270	74,6121	74,6124		
Mode28	74,7201	74,7419	74,7496	74,7290	74,7287	74,6857	74,6617	74,6420	74,6568	74,6190	74,6456		
Mode29	84,0329	84,1586	84,1673	84,0685	84,0077	83,9012	83,6719	83,5185	83,4427	83,4480	83,3054		
Mode30	84,0507	84,2568	84,1758	84,0793	84,0512	83,9758	83,7737	83,6014	83,5555	83,5695	83,3815		
Mode31	85,4183	85,4874	85,5216	85,4379	85,4489	85,3121	85,1560	85,0662	85,1073	85,0771	85,0926		
Mode32	85,4999	85,5750	85,5990	85,5269	85,5056	85,3747	85,3182	85,2366	85,2920	85,2017	85,1365		
Mode33	85,8501	85,9251	85,9765	85,8850	85,8846	85,8751	85,8565	85,8202	85,8518	85,8096	85,7444		
Mode34	86,6310	86,6843	86,7564	86,5688	86,5831	86,5907	86,5228	86,5274	86,6389	86,5788	86,4352		
Mode35	89,5163	89,5392	89,5300	89,4977	89,4810	89,4340	89,3600	89,2904	89,3056	89,2778	89,2678		
Mode36	91,1790	91,1947	91,1884	91,1783	91,1819	91,1847	91,1750	91,1794	91,1844	91,1794	91,1846		
Mode37	91,1812	91,2143	91,1934	91,1832	91,1879	91,1916	91,1823	91,1856	91,1901	91,1840	91,1945		
Mode38	99,7846	100,0620	99,9793	99,9026	99,9186	100,0730	99,8175	99,8935	100,0040	100,1890	99,7350		
Mode39	105,9600	106,2910	106,2600	106,0860	106,0120	105,8480	105,6450	105,3460	105,3860	105,3460	105,2700		
Mode40	106,9310	106,9910	107,0000	106,9160	106,8670	106,6960	106,5030	106,2940	106,2350	106,1420	106,1080		

Vamos a mostrar en un gráfico la variación de la frecuencia con respecto a los modos de vibración de la grieta circunferencial, (Profundidad 25%).

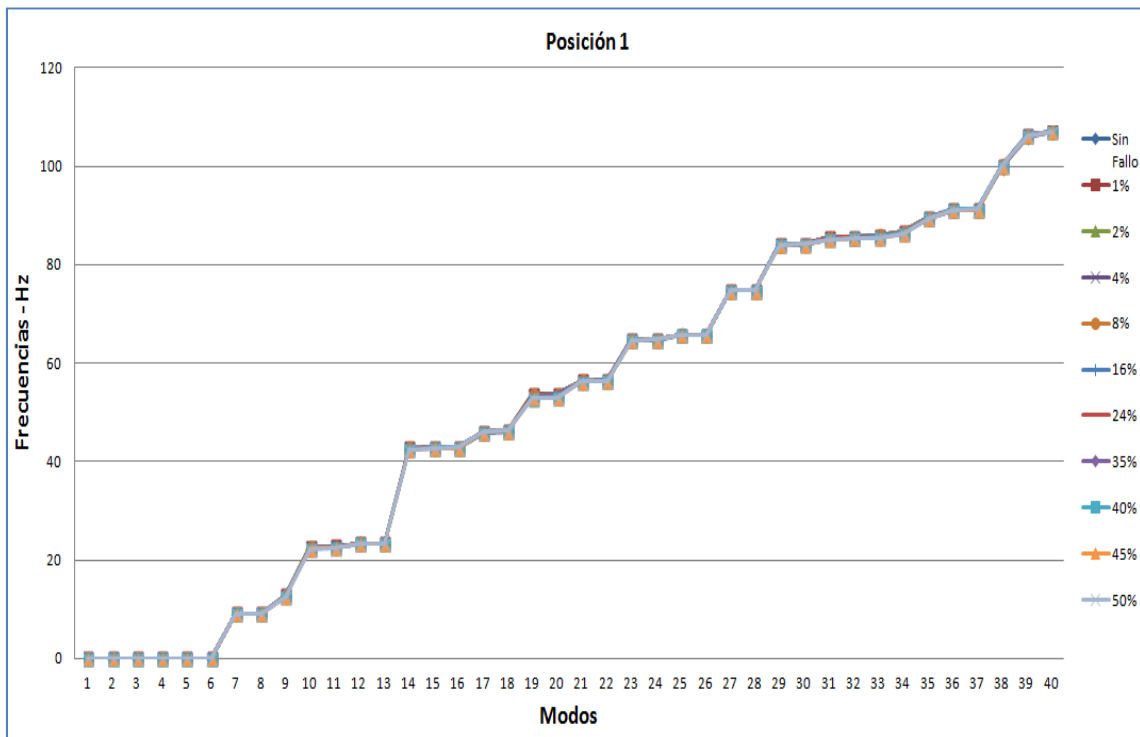


Figura 10.4. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 1', Profundidad 25%

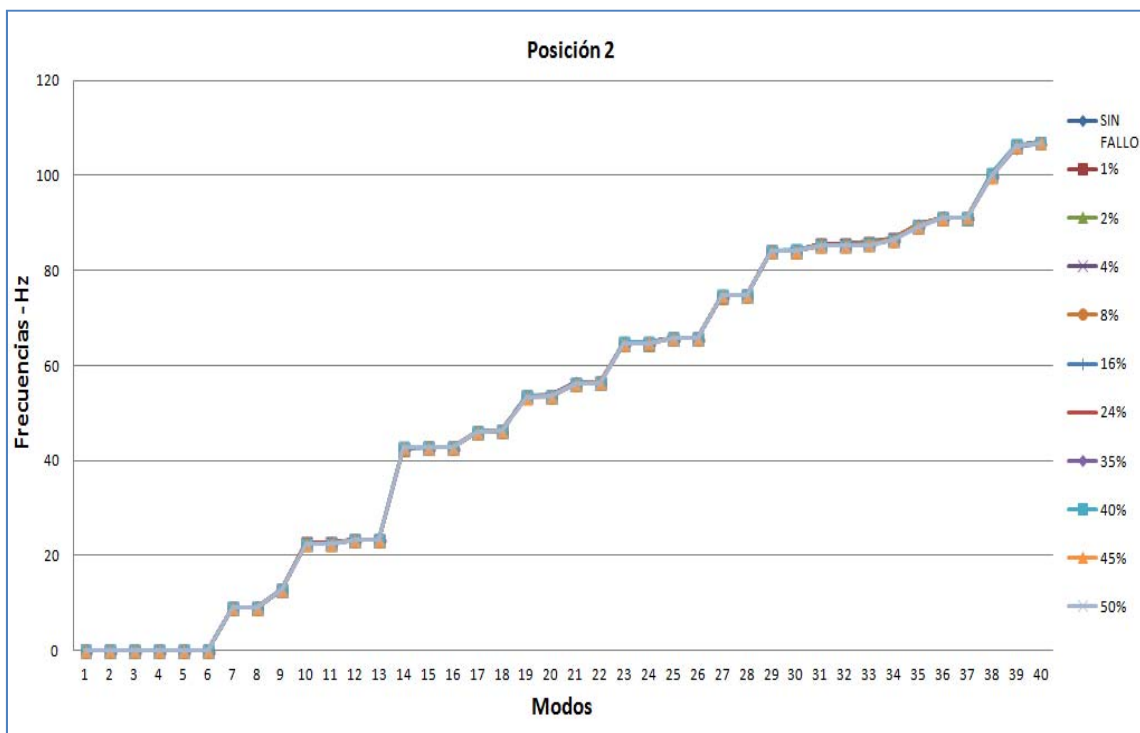


Figura 10.5. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 2', Profundidad 25%

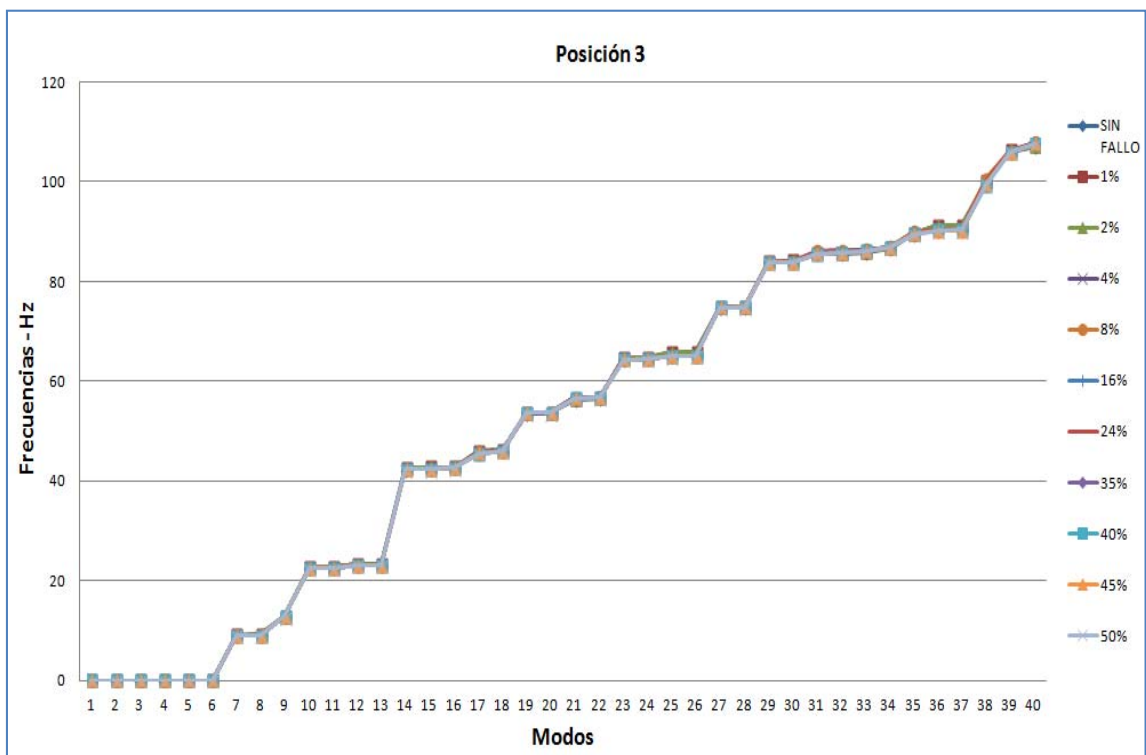


Figura 10.6. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 3', Profundidad 25%

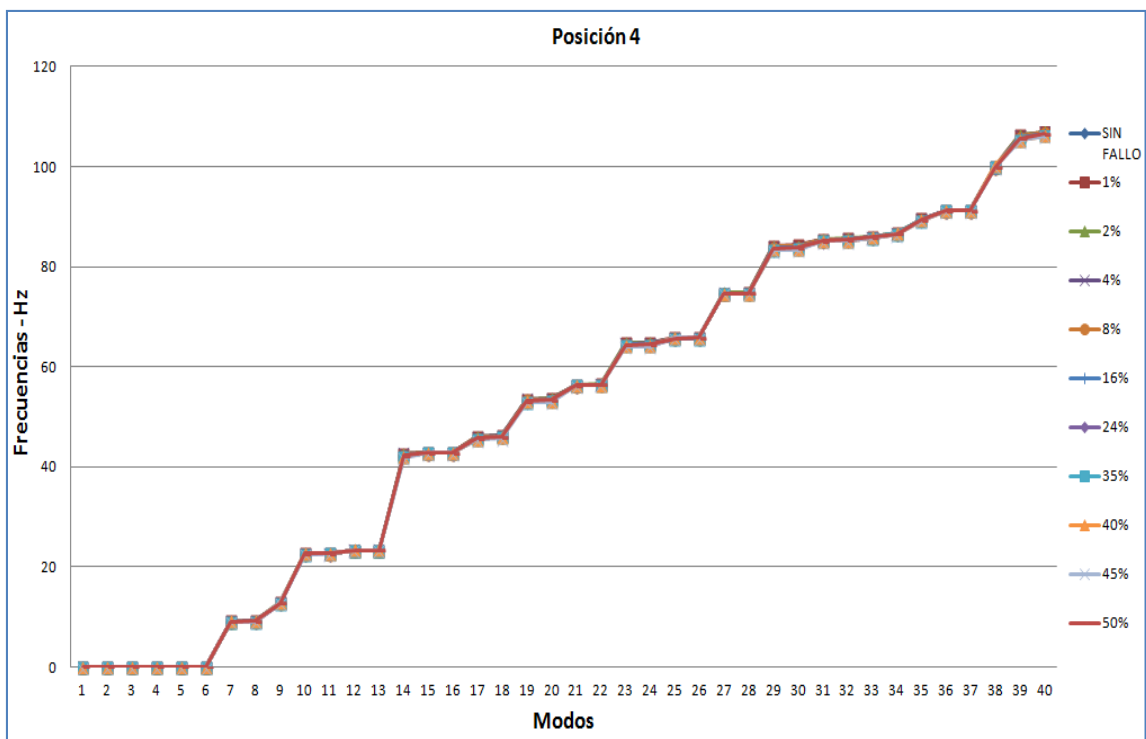


Figura 10.7. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 4', Profundidad 25%

10.4.1.1. DIFERENCIAS UNITARIAS EN LA GRIETA CIRCUNFERENCIAL (25%)

Tabla 10.11. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 1', Profundidad 25%.

Posición 1, Profundidad 25%											
	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%	
Mode7	-0,0053	-0,0013	-0,0045	-0,0026	-0,0021	0,0070	0,0226	0,0270	0,0319	0,0323	
Mode8	-0,0057	-0,0019	-0,0036	-0,0002	0,0027	0,0085	0,0115	0,0138	0,0184	0,0236	
Mode9	-0,0191	-0,0055	-0,0075	0,0101	0,0508	0,1111	0,2023	0,2380	0,2665	0,3022	
Mode10	-0,0652	-0,0344	-0,0564	-0,0477	0,0573	0,1848	0,2832	0,3211	0,3423	0,3725	
Mode11	-0,0307	0,0002	-0,0007	0,0388	0,0453	0,0953	0,2386	0,3075	0,3742	0,4500	
Mode12	-0,0047	-0,0024	-0,0051	-0,0032	-0,0039	-0,0005	0,0014	0,0021	0,0059	0,0051	
Mode13	-0,0034	-0,0024	-0,0046	-0,0014	-0,0058	-0,0032	0,0002	0,0014	0,0046	0,0054	
Mode14	-0,0682	-0,0356	-0,0744	-0,0454	0,0057	0,0598	0,1342	0,1875	0,2157	0,2491	
Mode15	-0,0046	-0,0029	-0,0078	-0,0021	-0,0057	-0,0047	-0,0043	-0,0062	-0,0009	-0,0026	
Mode16	-0,0039	-0,0039	-0,0067	-0,0023	-0,0067	-0,0053	-0,0041	-0,0053	-0,0015	-0,0020	
Mode17	-0,0778	-0,0600	-0,0602	-0,0836	-0,0740	-0,0789	-0,1114	-0,0796	-0,0665	-0,0569	
Mode18	-0,0724	-0,0340	-0,1060	-0,0973	-0,1104	-0,0714	-0,0749	-0,0568	-0,0429	-0,0484	
Mode19	-0,1241	-0,0871	-0,1285	-0,0474	0,1640	0,3673	0,5301	0,6005	0,6382	0,6634	
Mode20	-0,0393	0,0146	-0,0212	0,0289	0,0379	0,1220	0,3794	0,5282	0,6409	0,7881	
Mode21	-0,0572	-0,0130	-0,0307	0,0009	0,0129	0,0233	0,0526	0,0682	0,1277	0,1431	
Mode22	-0,0708	-0,0349	-0,0540	-0,0514	-0,0481	0,0004	0,0705	0,0802	0,1250	0,1303	
Mode23	-0,1036	-0,0707	-0,1468	-0,1338	-0,0910	-0,0817	-0,1120	-0,0439	-0,0047	-0,0112	
Mode24	-0,1434	-0,1102	-0,1311	-0,1273	-0,1625	-0,1298	-0,1027	-0,0923	-0,0499	-0,0317	
Mode25	-0,0058	-0,0046	-0,0131	-0,0004	-0,0066	-0,0076	-0,0085	-0,0139	-0,0026	-0,0033	
Mode26	-0,0058	-0,0062	-0,0141	-0,0018	-0,0083	-0,0117	-0,0071	-0,0119	-0,0061	-0,0085	
Mode27	-0,0467	-0,0202	-0,0305	-0,0234	-0,0270	-0,0150	0,0021	0,0024	0,0208	0,0173	
Mode28	-0,0464	-0,0195	-0,0379	-0,0328	-0,0411	-0,0345	-0,0226	-0,0173	0,0169	0,0156	
Mode29	-0,1866	-0,1225	-0,1910	-0,1774	-0,1529	-0,1628	-0,1499	-0,1497	-0,0409	-0,0383	
Mode30	-0,1964	-0,1699	-0,2439	-0,1799	-0,2228	-0,2075	-0,1875	-0,1535	-0,0390	-0,0723	
Mode31	-0,1347	-0,0766	-0,1127	-0,0997	-0,1380	-0,0968	0,1733	0,3160	0,3755	0,3857	
Mode32	-0,1323	-0,0535	-0,1111	-0,0822	-0,0586	-0,0577	0,0706	0,0967	0,1845	0,1849	
Mode33	-0,1038	-0,0824	-0,1707	-0,1223	-0,0092	0,2510	0,3101	0,3272	0,3980	0,4125	
Mode34	-0,1156	-0,1101	-0,1211	-0,0535	0,0875	0,1417	0,1725	0,2160	0,3179	0,4041	
Mode35	-0,0329	-0,0205	-0,0294	-0,0260	0,0093	0,0560	0,1350	0,1748	0,2059	0,2468	
Mode36	-0,0045	-0,0077	-0,0201	0,0052	-0,0038	-0,0134	-0,0109	-0,0225	-0,0028	-0,0025	
Mode37	-0,0162	-0,0117	-0,0394	-0,0004	-0,0145	-0,0258	-0,0135	-0,0293	-0,0117	-0,0149	
Mode38	-0,2124	-0,3844	-0,4204	-0,4834	-0,3974	-0,2594	-0,4664	-0,2444	-0,2614	-0,2414	
Mode39	-0,3290	-0,2430	-0,3850	-0,2750	-0,3160	-0,3840	-0,3230	-0,3940	-0,1200	-0,2020	
Mode40	-0,1320	-0,0640	-0,1020	-0,0890	-0,0990	-0,0810	-0,0550	-0,0600	-0,0010	-0,0110	

Tabla 10.12. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 2', Profundidad 25%.

Posición 2, Profundidad 25%											
	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%	
Mode7	-0,0031	-0,0031	-0,0022	-0,0018	0,0011	0,0048	0,0116	0,0120	0,0141	0,0164	
Mode8	-0,0030	-0,0030	-0,0041	-0,0028	-0,0025	0,0018	0,0083	0,0072	0,0112	0,0138	
Mode9	-0,0117	-0,0117	-0,0054	0,0001	0,0114	0,0306	0,0684	0,0705	0,0909	0,1039	
Mode10	-0,0339	-0,0339	-0,0122	-0,0240	-0,0337	0,0282	0,0885	0,0843	0,1329	0,1836	
Mode11	-0,0110	-0,0110	-0,0215	0,0107	0,0685	0,0915	0,1693	0,1854	0,2274	0,2263	
Mode12	-0,0031	-0,0031	-0,0021	-0,0029	-0,0015	-0,0014	0,0022	0,0020	0,0042	0,0047	
Mode13	-0,0033	-0,0033	-0,0038	-0,0027	-0,0034	0,0000	0,0026	0,0012	0,0007	0,0036	
Mode14	-0,0488	-0,0488	-0,0567	-0,0473	-0,0478	-0,0678	-0,0414	-0,0976	-0,0463	-0,0567	
Mode15	-0,0044	-0,0044	-0,0048	-0,0041	-0,0047	-0,0040	-0,0016	-0,0029	-0,0043	-0,0021	
Mode16	-0,0041	-0,0041	-0,0029	-0,0029	-0,0029	-0,0022	-0,0012	-0,0033	-0,0036	-0,0005	
Mode17	-0,0626	-0,0626	-0,0700	-0,0807	-0,0770	-0,0490	-0,0263	-0,0878	-0,0196	-0,0503	
Mode18	-0,0504	-0,0504	-0,0415	-0,0396	-0,0401	-0,0691	-0,0747	-0,0945	-0,0178	-0,0142	
Mode19	-0,0965	-0,0965	-0,0410	-0,0634	-0,0779	-0,0543	0,0302	0,0158	0,0857	0,1416	
Mode20	-0,0203	-0,0203	-0,0719	0,0082	0,0602	0,0850	0,1917	0,1170	0,2005	0,1840	
Mode21	-0,0282	-0,0282	-0,0291	-0,0088	-0,0083	0,0231	0,0641	0,0613	0,0977	0,1274	
Mode22	-0,0465	-0,0465	-0,0493	-0,0467	-0,0378	0,0114	0,0825	0,0731	0,0992	0,1226	
Mode23	-0,0858	-0,0858	-0,0729	-0,0778	-0,0762	-0,1229	-0,0953	-0,1647	-0,0348	-0,0670	
Mode24	-0,0992	-0,0992	-0,0853	-0,0914	-0,1026	-0,0782	-0,0771	-0,1415	-0,0469	-0,0521	
Mode25	-0,0071	-0,0071	-0,0053	-0,0051	-0,0074	-0,0078	-0,0069	-0,0078	-0,0134	-0,0052	
Mode26	-0,0066	-0,0066	-0,0066	-0,0038	-0,0029	-0,0040	-0,0025	-0,0080	-0,0109	-0,0057	
Mode27	-0,0257	-0,0257	-0,0254	-0,0251	-0,0276	-0,0150	0,0196	0,0017	0,0120	0,0296	
Mode28	-0,0281	-0,0281	-0,0295	-0,0311	-0,0351	-0,0154	0,0033	-0,0081	0,0119	0,0194	
Mode29	-0,1242	-0,1242	-0,1017	-0,1188	-0,1344	-0,1184	-0,0957	-0,1606	-0,0619	-0,0221	
Mode30	-0,1581	-0,1581	-0,1354	-0,1232	-0,1298	-0,1757	-0,1283	-0,2771	-0,0703	-0,1504	
Mode31	-0,1039	-0,1039	-0,0986	-0,1005	-0,1051	-0,0317	0,1320	0,0958	0,2372	0,2468	
Mode32	-0,0842	-0,0842	-0,1001	-0,0740	-0,0520	-0,0147	0,1721	0,1467	0,2127	0,2599	
Mode33	-0,1748	-0,1748	-0,1291	-0,0761	0,0265	0,1983	0,3695	0,2987	0,3729	0,4366	
Mode34	-0,0973	-0,0973	-0,0485	-0,0109	0,0488	0,1263	0,0835	0,0591	0,1436	0,2375	
Mode35	-0,0269	-0,0269	-0,0126	0,0005	0,0364	0,0939	0,1940	0,2208	0,2669	0,3262	
Mode36	-0,0109	-0,0109	-0,0057	-0,0047	-0,0053	-0,0099	-0,0052	-0,0136	-0,0159	-0,0072	
Mode37	-0,0141	-0,0141	-0,0151	-0,0075	-0,0074	-0,0113	-0,0139	-0,0204	-0,0375	-0,0141	
Mode38	-0,4954	-0,4954	-0,2464	-0,2794	-0,2085	-0,1502	-0,2414	-0,4894	-0,0198	-0,1151	
Mode39	-0,2540	-0,2540	-0,1920	-0,2210	-0,2480	-0,2850	-0,2450	-0,4410	-0,2080	-0,2180	
Mode40	-0,0820	-0,0820	-0,0910	-0,0780	-0,0820	-0,0360	0,0290	-0,0110	0,0140	0,0430	

Tabla 10.13. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 3', Profundidad 25%.

Posición 3, Profundidad 25%											
	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%	
Mode7	-0,0035	-0,0035	0,0568	0,0505	0,0590	0,0545	0,0657	0,0625	0,0666	0,0715	
Mode8	-0,0051	-0,0051	0,0498	0,0460	0,0568	0,0536	0,0581	0,0593	0,0688	0,0626	
Mode9	-0,0074	-0,0074	0,0281	0,0103	0,0422	0,0283	0,0566	0,0545	0,0634	0,0758	
Mode10	-0,0073	-0,0073	0,0395	-0,0247	0,0585	0,0569	0,1303	0,1480	0,1644	0,2030	
Mode11	-0,0138	-0,0138	0,0599	0,0784	0,1471	0,1254	0,2263	0,2444	0,2502	0,2657	
Mode12	-0,0045	-0,0045	0,2477	0,2394	0,2518	0,2435	0,2487	0,2436	0,2600	0,2489	
Mode13	-0,0041	-0,0041	0,2451	0,2304	0,2472	0,2299	0,2429	0,2377	0,2520	0,2444	
Mode14	-0,0443	-0,0443	0,3546	0,3182	0,3638	0,3308	0,3367	0,3256	0,3547	0,3343	
Mode15	-0,0047	-0,0047	0,4626	0,4482	0,4692	0,4388	0,4447	0,4497	0,4777	0,4514	
Mode16	-0,0055	-0,0055	0,1684	0,1151	0,1548	0,1351	0,1614	0,1619	0,1584	0,1409	
Mode17	-0,0235	-0,0235	0,1183	0,0808	0,1655	0,1527	0,3613	0,3824	0,3525	0,3493	
Mode18	-0,0333	-0,0333	0,1380	0,1422	0,2339	0,1766	0,2186	0,2349	0,2337	0,2472	
Mode19	-0,0572	-0,0572	-0,0961	-0,2305	-0,1268	-0,1828	-0,1374	-0,1378	-0,1183	-0,1341	
Mode20	-0,0485	-0,0485	-0,0257	-0,0888	-0,0194	-0,0663	-0,0371	-0,0632	-0,0377	-0,0402	
Mode21	-0,0869	-0,0869	-0,4122	-0,4364	-0,3726	-0,4281	-0,3587	-0,2751	-0,2856	-0,2087	
Mode22	-0,1181	-0,1181	-0,4315	-0,4440	-0,4332	-0,4192	-0,4551	-0,3625	-0,3349	-0,2682	
Mode23	-0,0289	-0,0289	0,1374	0,0964	0,2406	0,1507	0,3490	0,3083	0,2897	0,3077	
Mode24	-0,0895	-0,0895	0,1682	0,1118	0,2008	0,1150	0,2854	0,3118	0,3040	0,2834	
Mode25	-0,0072	-0,0072	0,7325	0,6793	0,7375	0,6589	0,6837	0,7037	0,7511	0,6942	
Mode26	-0,0083	-0,0083	0,7025	0,6526	0,7191	0,6389	0,6547	0,6601	0,7075	0,6791	
Mode27	-0,0449	-0,0449	-0,1427	-0,1622	-0,1513	-0,1514	-0,1853	-0,1346	-0,1040	-0,0749	
Mode28	-0,0643	-0,0643	-0,1817	-0,1979	-0,1816	-0,2228	-0,2054	-0,1349	-0,1456	-0,1150	
Mode29	-0,0450	-0,0450	0,1236	0,0255	0,2340	0,1022	0,2972	0,3214	0,3003	0,2497	
Mode30	-0,1723	-0,1723	0,0974	0,0025	0,1118	-0,0937	0,2526	0,2062	0,2302	0,2332	
Mode31	-0,1437	-0,1437	-0,5383	-0,7040	-0,5374	-0,6417	-0,2180	-0,1324	-0,1691	-0,0924	
Mode32	-0,1972	-0,1972	-0,7721	-0,7527	-0,5822	-0,6662	-0,5567	-0,3391	-0,3094	-0,1399	
Mode33	-0,0972	-0,0972	-0,5359	-0,5788	-0,4631	-0,5078	-0,5080	-0,3192	-0,2815	-0,1668	
Mode34	-0,0752	-0,0752	-0,2481	-0,3665	-0,2134	-0,2757	-0,1998	-0,1402	-0,1299	-0,1137	
Mode35	-0,0749	-0,0749	-0,4863	-0,4593	-0,3635	-0,3256	-0,1240	-0,0142	-0,0122	0,1267	
Mode36	-0,0053	-0,0053	0,9643	0,8617	1,0001	0,8232	0,8733	0,9091	1,0080	0,9184	
Mode37	-0,0230	-0,0230	0,9350	0,8249	0,9438	0,7392	0,7967	0,8755	0,9398	0,8620	
Mode38	-0,2484	-0,2484	-0,5944	-0,7454	-0,2554	-0,3764	0,3769	0,4368	0,3009	0,4581	
Mode39	-0,2600	-0,2600	-0,0480	-0,1930	0,0110	-0,3180	-0,0500	0,0950	0,1400	0,0450	
Mode40	-0,1080	-0,1080	-0,9430	-0,9850	-0,9460	-0,9790	-0,7770	-0,7240	-0,7170	-0,6460	

Tabla 10.14. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 4', Profundidad 25%.

Posición 4, Profundidad 25%												
	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%		
Mode7	-0,0030	-0,0033	-0,0013	-0,0011	0,0007	0,0037	0,0052	0,0019	0,0036	0,0041		
Mode8	-0,0011	-0,0046	-0,0003	-0,0005	0,0019	0,0029	0,0057	0,0035	0,0036	0,0062		
Mode9	-0,0018	-0,0204	0,0048	-0,0017	-0,0005	0,0038	0,0043	-0,0208	-0,0225	-0,0131		
Mode10	-0,0359	-0,0261	-0,0130	-0,0102	-0,0225	0,0129	0,0305	0,0081	0,0080	0,0416		
Mode11	0,0078	-0,0460	0,0159	0,0064	0,0452	0,0674	0,0818	0,0512	0,0340	0,0663		
Mode12	-0,0026	-0,0026	-0,0021	-0,0021	-0,0016	-0,0012	-0,0013	-0,0022	-0,0018	-0,0021		
Mode13	-0,0026	-0,0032	-0,0019	-0,0010	0,0002	0,0002	0,0007	-0,0014	-0,0004	-0,0010		
Mode14	-0,0237	-0,0292	0,0307	0,0806	0,2415	0,4000	0,5847	0,6159	0,6684	0,8109		
Mode15	-0,0054	-0,0043	-0,0033	-0,0035	-0,0033	-0,0036	-0,0057	-0,0066	-0,0073	-0,0090		
Mode16	-0,0038	-0,0025	-0,0023	-0,0017	-0,0032	-0,0039	-0,0046	-0,0073	-0,0052	-0,0090		
Mode17	-0,0495	-0,0491	-0,0277	-0,0276	-0,0049	0,1695	0,3578	0,4065	0,3914	0,4395		
Mode18	-0,0629	-0,0076	0,0067	0,0612	0,1345	0,1882	0,1894	0,2295	0,2316	0,4255		
Mode19	-0,0775	-0,0824	-0,0337	0,0093	0,2571	0,3769	0,5002	0,4288	0,4034	0,5716		
Mode20	0,0461	-0,0455	0,1149	0,1318	0,1478	0,2547	0,4213	0,4509	0,5642	0,6575		
Mode21	-0,0229	-0,0372	0,0018	-0,0147	0,0291	0,0711	0,0933	0,0476	0,1025	0,0593		
Mode22	-0,0351	-0,0544	-0,0253	-0,0269	0,0074	0,0359	0,0805	0,0622	0,0863	0,0621		
Mode23	-0,1085	-0,0619	-0,0237	0,0062	0,1155	0,3185	0,3503	0,3915	0,4045	0,5747		
Mode24	-0,0877	-0,0652	-0,0080	0,0328	0,0570	0,1744	0,3745	0,4308	0,3986	0,5711		
Mode25	-0,0107	-0,0061	-0,0025	-0,0037	-0,0059	-0,0034	-0,0059	-0,0107	-0,0082	-0,0140		
Mode26	-0,0097	-0,0044	-0,0029	-0,0031	-0,0041	-0,0031	-0,0059	-0,0067	-0,0054	-0,0095		
Mode27	-0,0212	-0,0359	-0,0045	-0,0111	0,0214	0,0420	0,0794	0,0706	0,0855	0,0852		
Mode28	-0,0218	-0,0295	-0,0089	-0,0086	0,0344	0,0584	0,0781	0,0633	0,1011	0,0745		
Mode29	-0,1257	-0,1344	-0,0356	0,0252	0,1317	0,3610	0,5144	0,5902	0,5849	0,7275		
Mode30	-0,2061	-0,1251	-0,0286	-0,0005	0,0749	0,2770	0,4493	0,4952	0,4812	0,6692		
Mode31	-0,0691	-0,1033	-0,0196	-0,0306	0,1062	0,2623	0,3521	0,3110	0,3412	0,3257		
Mode32	-0,0751	-0,0991	-0,0270	-0,0057	0,1252	0,1817	0,2633	0,2079	0,2982	0,3634		
Mode33	-0,0750	-0,1264	-0,0349	-0,0345	-0,0250	-0,0064	0,0299	-0,0017	0,0405	0,1057		
Mode34	-0,0533	-0,1254	0,0622	0,0479	0,0403	0,1082	0,1036	-0,0079	0,0522	0,1958		
Mode35	-0,0229	-0,0137	0,0186	0,0353	0,0823	0,1563	0,2259	0,2107	0,2385	0,2485		
Mode36	-0,0157	-0,0094	0,0007	-0,0029	-0,0057	0,0040	-0,0004	-0,0054	-0,0004	-0,0056		
Mode37	-0,0331	-0,0122	-0,0020	-0,0067	-0,0104	-0,0011	-0,0044	-0,0089	-0,0028	-0,0133		
Mode38	-0,2774	-0,1947	-0,1180	-0,1340	-0,2884	-0,0329	-0,1089	-0,2194	-0,4044	0,0496		
Mode39	-0,3310	-0,3000	-0,1260	-0,0520	0,1120	0,3150	0,6140	0,5740	0,6140	0,6900		
Mode40	-0,0600	-0,0690	0,0150	0,0640	0,2350	0,4280	0,6370	0,6960	0,7890	0,8230		

De las tablas anteriores podemos decir que los valores máximos para la diferencia unitaria en la grieta circunferencial se dan en 'Modo 36 y Porcentaje 45% de la posición 3, 'Modo 37 y Porcentaje 16% de la posición 3', 'Modo 40 y Porcentaje 50% de la posición 4', 'Modo 14 y porcentaje 50% de la posición 4, 'Modo 20 y Porcentaje 50% de la posición 1', 'Modo 25 y Porcentaje 45% de la posición 3 con 1,0080Hz, 0,9438Hz, 0,8230Hz, 0,8109Hz, 0,7881Hz, 0,7511Hz respectivamente.

Ahora vamos a ver las diferencias unitarias medias en cada porcentaje de avance de grieta para cada una de las posiciones.

Tabla 10.15 Medias de diferencias unitarias según % y posición, Profundidad 25%.

Posición 1, Profundidad 25%									
1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
-0,0765	-0,0554	-0,0851	-0,0650	-0,0451	-0,0090	0,0334	0,0626	0,1076	0,1201
-0,0012									
Posición 2, Profundidad 25%									
1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
-0,0679	-0,0679	-0,0535	-0,0481	-0,0385	-0,0185	0,0196	-0,0170	0,0478	0,0572
-0,0187									
Posición 3, Profundidad 25%									
1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
-0,0636	-0,0636	0,0110	-0,0399	0,0530	-0,0118	0,0973	0,1369	0,1479	0,1633
0,0431									
Posición 4, Profundidad 25%									
1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
-0,0552	-0,0569	-0,0083	0,0034	0,0478	0,1241	0,1850	0,1779	0,1902	0,2521
0,0860									

Podemos decir a tenor de la anterior tabla, que en general a medida que aumenta el avance de grieta aumenta la diferencia unitaria, dándose en las 4 posiciones que el valor máximo para la media de las diferencias está en el 50%. También podemos destacar que la posición 4 es la que tiene una mayor diferencia media.

Lo siguiente será presentar las tablas de la diferencia unitaria media para cada modo en cada posición.

Tabla 10.16. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Posición 1 y Profundidad 25%'.

Posición 1, Profundidad 25%		Posición 1, Profundidad 25%	
modo 7	0,0105	modo 24	-0,1081
modo 8	0,0067	modo 25	-0,0066
modo 9	0,1149	modo 26	-0,0081
modo 10	0,1357	modo 27	-0,0120
modo 11	0,1518	modo 28	-0,0220
modo 12	-0,0005	modo 29	-0,1372
modo 13	-0,0009	modo 30	-0,1673
modo 14	0,0628	modo 31	0,0592
modo 15	-0,0042	modo 32	0,0041
modo 16	-0,0042	modo 33	0,1210
modo 17	-0,0749	modo 34	0,0939
modo 18	-0,0714	modo 35	0,0719
modo 19	0,2576	modo 36	-0,0083
modo 20	0,2480	modo 37	-0,0177
modo 21	0,0328	modo 38	-0,3371
modo 22	0,0147	modo 39	-0,2971
modo 23	-0,0799	modo 40	-0,0694

Tabla 10.17. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Posición 2 y Profundidad 25%'.

Posición 2, Profundidad 25%		Posición 2, Profundidad 25%	
modo 7	0,0050	modo 24	-0,0874
modo 8	0,0027	modo 25	-0,0073
modo 9	0,0347	modo 26	-0,0058
modo 10	0,0380	modo 27	-0,0082
modo 11	0,0936	modo 28	-0,0141
modo 12	-0,0001	modo 29	-0,1062
modo 13	-0,0008	modo 30	-0,1506
modo 14	-0,0559	modo 31	0,0168
modo 15	-0,0037	modo 32	0,0382
modo 16	-0,0028	modo 33	0,1148
modo 17	-0,0586	modo 34	0,0445
modo 18	-0,0492	modo 35	0,1072
modo 19	-0,0156	modo 36	-0,0089
modo 20	0,0734	modo 37	-0,0155
modo 21	0,0271	modo 38	-0,2741
modo 22	0,0162	modo 39	-0,2566
modo 23	-0,0883	modo 40	-0,0851

Tabla 10.18. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Posición 3 y Profundidad 25%'.

Posición 3, Profundidad 25%	
modo 7	0,0480
modo 8	0,0445
modo 9	0,0344
modo 10	0,0761
modo 11	0,1370
modo 12	0,1975
modo 13	0,1921
modo 14	0,2630
modo 15	0,3633
modo 16	0,1185
modo 17	0,1916
modo 18	0,1559
modo 19	-0,1278
modo 20	-0,0475
modo 21	-0,2951
modo 22	-0,3385
modo 23	0,1822

Posición 3, Profundidad 25%	
modo 24	0,1601
modo 25	0,5627
modo 26	0,5398
modo 27	-0,1196
modo 28	-0,1513
modo 29	0,1564
modo 30	0,0696
modo 31	-0,3321
modo 32	-0,4513
modo 33	-0,3556
modo 34	-0,1838
modo 35	-0,1808
modo 36	0,7348
modo 37	0,6871
modo 38	-0,0896
modo 39	-0,0838
modo 40	-0,6933

Tabla 10.19. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Posición 4 y Profundidad 25%'.

Posición 4, Profundidad 25%	
modo 7	0,0010
modo 8	0,0017
modo 9	-0,0068
modo 10	-0,0007
modo 11	0,0330
modo 12	-0,0020
modo 13	-0,0010
modo 14	0,3380
modo 15	-0,0052
modo 16	-0,0044
modo 17	0,1606
modo 18	0,1396
modo 19	0,2354
modo 20	0,2744
modo 21	0,0330
modo 22	0,0193
modo 23	0,1967

Posición 4, Profundidad 25%	
modo 24	0,1878
modo 25	-0,0071
modo 26	-0,0055
modo 27	0,0311
modo 28	0,0341
modo 29	0,2639
modo 30	0,2087
modo 31	0,1476
modo 32	0,1233
modo 33	-0,0128
modo 34	0,0424
modo 35	0,1180
modo 36	-0,0041
modo 37	-0,0095
modo 38	-0,1729
modo 39	0,2110
modo 40	0,3558

Tabla 10.20. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Profundidad 25%'

Media (Profundidad 25%)		Media (Profundidad 25%)	
modo 7	0,0129	modo 24	0,0305
modo 8	0,0111	modo 25	0,1083
modo 9	0,0354	modo 26	0,1041
modo 10	0,0498	modo 27	-0,0217
modo 11	0,0831	modo 28	-0,0307
modo 12	0,0390	modo 29	0,0354
modo 13	0,0379	modo 30	-0,0079
modo 14	0,1216	modo 31	-0,0217
modo 15	0,0700	modo 32	-0,0571
modo 16	0,0214	modo 33	-0,0265
modo 17	0,0437	modo 34	-0,0006
modo 18	0,0350	modo 35	0,0233
modo 19	0,0699	modo 36	0,1427
modo 20	0,1096	modo 37	0,1289
modo 21	-0,0405	modo 38	-0,1747
modo 22	-0,0577	modo 39	-0,0853
modo 23	0,0421	modo 40	-0,0984

Los modos donde las diferencias medias son mayores son el 36, 37, 14, 20, 25 y 26. Son casi los mismos modos que concluimos con las mayores diferencias unitarias, por lo que parece que serán los modos más a tener en cuenta a la hora de estudiar la rueda.

10.4.2. Resultados para Profundidad de grieta 50%

Tabla 10.21. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 1', Profundidad 50%.

	SIN FALLO	GRIETA CIRCUNFERENCIAL									
		1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
Mode7	9,1287	9,1316	9,1283	9,1321	9,1305	9,1135	9,0993	9,0607	9,0430	9,0336	9,1336
Mode8	9,1433	9,1452	9,1426	9,1416	9,1369	9,1239	9,1004	9,0938	9,0883	9,0808	9,1476
Mode9	12,8380	12,8467	12,8204	12,8229	12,7799	12,6468	12,4615	12,2014	12,0871	11,9947	12,8479
Mode10	22,6468	22,6743	22,6419	22,6806	22,6039	22,2678	21,9285	21,6274	21,5462	21,5276	22,6792
Mode11	22,7596	22,7560	22,7301	22,7117	22,6870	22,6732	22,5410	22,2213	22,0251	21,8226	22,7833
Mode12	23,3720	23,3740	23,3717	23,3745	23,3766	23,3739	23,3656	23,3630	23,3591	23,3555	23,3765
Mode13	23,3746	23,3773	23,3766	23,3762	23,3779	23,3774	23,3706	23,3662	23,3603	23,3568	23,3806
Mode14	42,6381	42,6639	42,6485	42,6515	42,6362	42,4795	42,2980	42,0627	41,9843	41,8771	42,6870
Mode15	42,7780	42,7798	42,7802	42,7806	42,7857	42,7862	42,7776	42,7790	42,7771	42,7765	42,7844
Mode16	42,7803	42,7819	42,7820	42,7829	42,7865	42,7886	42,7825	42,7810	42,7793	42,7794	42,7867
Mode17	45,8893	45,9184	45,9244	45,9393	45,9686	45,9747	45,9630	45,9256	45,9224	45,9147	45,9807
Mode18	46,1807	46,1953	46,2259	46,2230	46,2948	46,2451	46,2228	46,2106	46,2151	46,1979	46,2291
Mode19	53,4808	53,5492	53,5118	53,5201	53,3321	52,6732	52,1800	51,7433	51,6487	51,5895	53,5557
Mode20	53,6526	53,6599	53,5666	53,5588	53,5714	53,5752	53,2613	52,6244	52,2545	51,8737	53,6846
Mode21	56,3334	56,3202	56,3167	56,3110	56,2228	56,0701	56,0401	55,9883	55,8937	55,7909	56,3754
Mode22	56,4473	56,4627	56,4666	56,4988	56,4954	56,4195	56,2563	56,0291	55,9315	55,8819	56,4990
Mode23	64,6425	64,6742	64,6648	64,7333	64,7557	64,7107	64,6712	64,5819	64,5765	64,5368	64,7386
Mode24	64,7024	64,7600	64,7989	64,7757	64,8600	64,7632	64,7320	64,6512	64,6016	64,5586	64,8461
Mode25	65,7342	65,7345	65,7395	65,7382	65,7442	65,7487	65,7459	65,7415	65,7404	65,7421	65,7415
Mode26	65,7599	65,7600	65,7620	65,7614	65,7706	65,7776	65,7632	65,7642	65,7654	65,7675	65,7697
Mode27	74,6976	74,6982	74,7032	74,7166	74,6902	74,6438	74,6051	74,5573	74,5290	74,5259	74,7342
Mode28	74,7201	74,7240	74,7332	74,7561	74,7566	74,7370	74,7061	74,6708	74,6064	74,5692	74,7530
Mode29	84,0329	84,0996	84,1051	84,1595	84,2308	84,1395	84,1002	83,8895	83,6726	83,5641	84,1877
Mode30	84,0507	84,1106	84,1402	84,1744	84,2611	84,2095	84,1358	83,9988	83,9182	83,8387	84,2738
Mode31	85,4183	85,4392	85,4398	85,5038	85,4777	85,2805	84,9472	84,0424	83,9549	83,9261	85,5272
Mode32	85,4999	85,5170	85,5282	85,5899	85,5296	85,4200	85,0471	84,8826	84,7078	84,5976	85,6021
Mode33	85,8501	85,9133	85,8349	85,9345	85,9167	85,8200	85,5159	85,4360	85,3339	85,2661	85,9452
Mode34	86,6310	86,6581	86,6091	86,5801	86,4862	86,2990	86,0628	86,0079	85,9976	85,9017	86,7282
Mode35	89,5163	89,5225	89,5112	89,5144	89,4777	89,3803	89,2143	88,9201	88,7748	88,6433	89,5380
Mode36	91,1790	91,1741	91,1823	91,1789	91,1961	91,2035	91,1889	91,1887	91,1831	91,1938	91,1922
Mode37	91,1812	91,1811	91,1942	91,1862	91,1971	91,2171	91,2055	91,1898	91,2034	91,2032	91,1942
Mode38	99,7846	99,9578	99,8368	99,9954	100,1760	100,2060	99,9900	99,9320	100,0640	99,9862	100,1020
Mode39	105,9600	106,0900	106,1050	106,1820	106,2960	106,2450	106,2200	106,0550	106,0290	105,9410	106,3080
Mode40	106,9310	106,9520	106,9680	107,0230	106,9970	106,9320	106,8500	106,8010	106,7400	106,7300	107,0300

Tabla 10.22. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 2', Profundidad 50%.

	GRIETA CIRCUNFERENCIAL													
	SIN FALLO	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%			
Mode7	9,1287	9,1327	9,1321	9,1302	9,1311	9,1194	9,1053	9,0844	9,0654	9,0644	9,0592			
Mode8	9,1433	9,1471	9,1471	9,1462	9,1472	9,1347	9,1221	9,1080	9,1005	9,0988	9,0902			
Mode9	12,8380	12,8481	12,8452	12,8376	12,8296	12,7605	12,6550	12,5256	12,4197	12,4102	12,3555			
Mode10	22,6468	22,6729	22,6829	22,6837	22,6606	22,4254	22,1751	21,9569	21,7969	21,8318	21,8085			
Mode11	22,7596	22,7879	22,7726	22,7448	22,7109	22,6825	22,5557	22,3252	22,1141	22,0509	21,8526			
Mode12	23,3720	23,3761	23,3749	23,3738	23,3768	23,3710	23,3679	23,3604	23,3564	23,3544	23,3504			
Mode13	23,3746	23,3789	23,3778	23,3793	23,3811	23,3748	23,3693	23,3641	23,3574	23,3593	23,3550			
Mode14	42,6381	42,6792	42,6883	42,6781	42,6929	42,6708	42,6357	42,6155	42,5555	42,5893	42,5666			
Mode15	42,7780	42,7826	42,7812	42,7822	42,7842	42,7798	42,7776	42,7753	42,7700	42,7739	42,7730			
Mode16	42,7803	42,7868	42,7835	42,7849	42,7897	42,7830	42,7789	42,7777	42,7730	42,7747	42,7740			
Mode17	45,8893	45,9704	45,9861	45,9401	45,9507	45,9364	45,8687	45,8037	45,7170	45,7422	45,7204			
Mode18	46,1807	46,2228	46,2351	46,2443	46,1829	46,1724	46,1301	46,1308	46,0964	46,1344	46,1092			
Mode19	53,4808	53,5423	53,5526	53,5486	53,5633	53,3290	53,0740	52,8319	52,5984	52,6454	52,5852			
Mode20	53,6526	53,6912	53,6642	53,6371	53,6329	53,5665	53,3686	53,0948	52,8290	52,7968	52,6256			
Mode21	56,3334	56,3831	56,3575	56,2990	56,1983	56,0968	55,9939	55,8970	55,7467	55,6557	55,5592			
Mode22	56,4473	56,5135	56,4982	56,4877	56,5466	56,3475	56,1605	55,9371	55,8660	55,8072	55,7094			
Mode23	64,6425	64,7183	64,7466	64,6957	64,6628	64,7120	64,6546	64,6317	64,5421	64,6011	64,5740			
Mode24	64,7024	64,8373	64,7966	64,8267	64,7906	64,7490	64,6846	64,6728	64,5878	64,6385	64,5812			
Mode25	65,7342	65,7432	65,7392	65,7419	65,7498	65,7427	65,7346	65,7360	65,7277	65,7336	65,7399			
Mode26	65,7599	65,7692	65,7624	65,7662	65,7664	65,7653	65,7621	65,7618	65,7525	65,7636	65,7686			
Mode27	74,6976	74,7430	74,7274	74,7085	74,6909	74,6366	74,5806	74,4950	74,4554	74,4411	74,3994			
Mode28	74,7201	74,7648	74,7503	74,7492	74,7678	74,6759	74,6189	74,5719	74,5036	74,4665	74,4370			
Mode29	84,0329	84,1659	84,1370	84,1356	84,0397	84,1193	83,9800	83,4206	82,8448	82,8668	82,8347			
Mode30	84,0507	84,2599	84,2031	84,2162	84,2566	84,1542	84,0180	83,9930	83,6844	83,6348	83,4335			
Mode31	85,4183	85,5596	85,5044	85,4901	85,4739	84,8311	84,4743	84,0356	83,8579	83,9838	83,9041			
Mode32	85,4999	85,6361	85,5970	85,5850	85,5590	85,1969	84,5369	84,2363	83,9883	84,0223	83,9898			
Mode33	85,8501	86,0122	85,9111	85,9114	85,9358	85,7577	85,5191	85,3627	85,2726	85,1968	84,9352			
Mode34	86,6310	86,7279	86,7423	86,6530	86,5419	86,3041	86,0214	85,8063	85,5987	85,6845	85,5847			
Mode35	89,5163	89,5414	89,5383	89,5061	89,3960	89,2110	88,9050	88,3641	87,9968	87,8438	87,4260			
Mode36	91,1790	91,1932	91,1826	91,1867	91,1913	91,1884	91,1756	91,1828	91,1633	91,1795	91,1900			
Mode37	91,1812	91,2023	91,1869	91,1982	91,2026	91,2033	91,1893	91,1894	91,1706	91,1960	91,2276			
Mode38	99,7846	100,2010	100,1100	100,0670	100,0390	99,9984	99,4461	99,2529	98,9694	99,1676	98,9962			
Mode39	105,9600	106,2700	106,1540	106,1810	106,3030	106,1860	106,0980	106,0490	105,8760	105,9060	105,9120			
Mode40	106,9310	107,0650	107,0160	106,9860	106,9420	106,7240	106,5890	106,4750	106,3540	106,3630	106,2290			

Tabla 10.23. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 3', Profundidad 50%.

	GRIETA CIRCUNFERENCIAL												
	SIN FALLO	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%		
Mode7	9,1287	9,0705	9,0705	9,0738	9,0766	9,0672	9,0580	9,0419	9,0336	9,0867	9,0769		
Mode8	9,1433	9,0903	9,0903	9,0943	9,0953	9,0805	9,0657	9,0480	9,0440	9,0959	9,0884		
Mode9	12,8380	12,8026	12,8026	12,8086	12,8181	12,7676	12,7172	12,6444	12,5939	12,6298	12,5910		
Mode10	22,6468	22,6000	22,6000	22,6216	22,6250	22,3854	22,1786	21,9424	21,8424	21,9521	21,8934		
Mode11	22,7596	22,6717	22,6717	22,6989	22,6786	22,5990	22,4904	22,2722	22,0829	22,1322	21,9343		
Mode12	23,3720	23,1238	23,1238	23,1339	23,1270	23,1228	23,1206	23,1060	23,1203	23,3544	23,3479		
Mode13	23,3746	23,1350	23,1350	23,1372	23,1387	23,1380	23,1362	23,1309	23,1270	23,3557	23,3521		
Mode14	42,6381	42,2935	42,2935	42,3089	42,2997	42,3053	42,3026	42,2976	42,3150	42,6254	42,6089		
Mode15	42,7780	42,3216	42,3216	42,3293	42,3254	42,3189	42,3181	42,3271	42,3459	42,7715	42,7668		
Mode16	42,7803	42,5851	42,5851	42,6478	42,6473	42,6273	42,5975	42,5428	42,5248	42,7723	42,7691		
Mode17	45,8893	45,7371	45,7371	45,7702	45,7987	45,7027	45,4640	45,0477	44,7627	45,0630	44,9669		
Mode18	46,1807	46,0129	46,0129	46,1348	45,9813	45,7702	45,6971	45,6421	45,6337	45,8022	45,6052		
Mode19	53,4808	53,5583	53,5583	53,6005	53,6618	53,6085	53,5196	53,4929	53,4428	53,4476	53,4318		
Mode20	53,6526	53,6257	53,6257	53,6960	53,7387	53,6900	53,6735	53,5602	53,5532	53,5276	53,5051		
Mode21	56,3334	56,7301	56,7301	56,7267	56,8197	56,5999	56,3503	56,1802	55,9020	55,4787	55,3137		
Mode22	56,4473	56,8760	56,8760	56,8843	56,8762	56,6505	56,4151	56,2133	56,1149	55,6209	55,4752		
Mode23	64,6425	64,4544	64,4544	64,5421	64,4902	64,3262	64,1071	64,0281	63,9040	64,1759	64,0447		
Mode24	64,7024	64,5098	64,5098	64,6220	64,5518	64,3987	64,3368	64,0503	63,9767	64,2346	64,1094		
Mode25	65,7342	65,0182	65,0182	65,0292	65,0361	65,0131	65,0188	65,0376	65,0755	65,7352	65,7287		
Mode26	65,7599	65,0792	65,0792	65,1058	65,0752	65,0896	65,0834	65,0841	65,1405	65,7534	65,7489		
Mode27	74,6976	74,8492	74,8492	74,8419	74,8864	74,7795	74,6554	74,5434	74,4099	74,2487	74,1636		
Mode28	74,7201	74,8826	74,8826	74,8943	74,9244	74,8019	74,6772	74,6438	74,5501	74,3108	74,1999		
Mode29	84,0329	83,8683	83,8683	83,9445	83,9460	83,6824	83,1725	82,9846	82,6968	82,4856	82,0365		
Mode30	84,0507	83,9414	83,9414	84,0752	84,0240	83,8167	83,7594	83,3253	82,7805	82,7362	82,4291		
Mode31	85,4183	85,9346	85,9346	86,0079	85,9728	84,7974	84,1484	83,9052	83,6684	83,4898	83,2699		
Mode32	85,4999	86,2475	86,2475	86,2649	86,1777	85,7594	85,0913	84,1437	83,7806	83,8914	83,8289		
Mode33	85,8501	86,3874	86,3874	86,3796	86,4820	86,1735	86,0414	85,9147	85,1682	84,9181	84,5207		
Mode34	86,6310	86,8621	86,8621	86,8915	86,9398	86,7500	86,5642	86,0046	85,6002	84,9677	84,5345		
Mode35	89,5163	89,9817	89,9817	89,9840	89,9238	89,5056	88,8921	87,7624	87,4195	87,0825	86,5072		
Mode36	91,1790	90,2471	90,2471	90,2858	90,2628	90,2573	90,2191	90,2720	90,3831	91,1787	91,1736		
Mode37	91,1812	90,2875	90,2875	90,3240	90,2985	90,2695	90,2799	90,3260	90,4069	91,1895	91,1765		
Mode38	99,7846	100,3370	100,3370	100,5210	100,4100	99,2686	98,2227	96,9851	96,4570	96,3880	96,0638		
Mode39	105,9600	106,0040	106,0040	106,1010	106,2110	105,8610	105,5510	105,6250	105,1990	104,9800	104,6490		
Mode40	106,9310	107,8830	107,8830	107,8720	107,8520	107,3450	107,1210	106,8340	106,5360	105,6170	105,3010		

Tabla 10.24. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 4', Profundidad 50%.

	GRIETA CIRCUNFERENCIAL									
	SIN FALLO	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	50%
Mode7	9,1287	9,1307	9,1317	9,1306	9,1300	9,1264	9,1226	9,1226	9,1129	9,1028
Mode8	9,1433	9,1451	9,1449	9,1432	9,1441	9,1352	9,1314	9,1314	9,1264	9,1169
Mode9	12,8380	12,8409	12,8408	12,8388	12,8552	12,8433	12,8519	12,8519	12,8375	12,8320
Mode10	22,6468	22,6748	22,6613	22,6633	22,6973	22,6274	22,5727	22,5727	22,5047	22,4454
Mode11	22,7596	22,7530	22,7556	22,7368	22,7263	22,6772	22,6689	22,6689	22,5625	22,4803
Mode12	23,3720	23,3746	23,3753	23,3734	23,3759	23,3744	23,3736	23,3736	23,3744	23,3682
Mode13	23,3746	23,3756	23,3774	23,3777	23,3780	23,3748	23,3754	23,3754	23,3751	23,3690
Mode14	42,6381	42,6506	42,6357	42,5571	42,3943	41,8312	41,3046	41,3046	40,7289	40,1573
Mode15	42,7780	42,7803	42,7823	42,7827	42,7847	42,7836	42,7871	42,7871	42,7912	42,7890
Mode16	42,7803	42,7826	42,7849	42,7831	42,7873	42,7853	42,7886	42,7886	42,7949	42,7895
Mode17	45,8893	45,9275	45,9473	45,9114	45,9184	45,7551	45,3567	45,3567	44,7044	44,3407
Mode18	46,1807	46,1964	46,1752	46,1172	46,0280	45,7712	45,7068	45,7068	45,5958	44,9981
Mode19	53,4808	53,5522	53,5362	53,4502	53,2179	52,6031	52,2634	52,2634	52,0514	51,8093
Mode20	53,6526	53,6096	53,5980	53,5407	53,6006	53,4955	53,2888	53,2888	52,7479	51,9587
Mode21	56,3334	56,3419	56,3259	56,2837	56,2620	56,1328	55,9807	55,9807	55,8144	55,6558
Mode22	56,4473	56,4854	56,4794	56,4554	56,4279	56,2883	56,2088	56,2088	55,9885	55,7302
Mode23	64,6425	64,6804	64,6965	64,6239	64,5167	64,2972	63,8520	63,8520	63,6119	63,0126
Mode24	64,7024	64,7556	64,7386	64,6702	64,7234	64,3180	64,2206	64,2206	63,6458	63,0825
Mode25	65,7342	65,7360	65,7392	65,7388	65,7433	65,7386	65,7488	65,7488	65,7511	65,7417
Mode26	65,7599	65,7650	65,7687	65,7650	65,7690	65,7623	65,7705	65,7705	65,7779	65,7659
Mode27	74,6976	74,7135	74,6991	74,6696	74,6574	74,5132	74,4293	74,4293	74,3173	74,1398
Mode28	74,7201	74,7327	74,7333	74,7120	74,6723	74,5638	74,4911	74,4911	74,3264	74,1596
Mode29	84,0329	84,1014	84,0926	83,9677	83,8218	83,3315	82,6160	82,6160	81,7946	81,2674
Mode30	84,0507	84,1304	84,1600	84,0790	84,1365	83,3400	83,0332	83,0332	82,2165	81,3328
Mode31	85,4183	85,4546	85,4373	85,3577	85,2799	84,9048	84,7693	84,7693	84,3897	83,7232
Mode32	85,4999	85,5578	85,5359	85,4419	85,3257	84,9917	84,7990	84,7990	84,6419	84,0365
Mode33	85,8501	85,9037	85,9267	85,8776	86,0116	85,8670	85,8450	85,8450	85,7304	85,3294
Mode34	86,6310	86,6721	86,6688	86,5714	86,6234	86,4612	86,4304	86,4304	86,3361	86,0448
Mode35	89,5163	89,5178	89,5064	89,4502	89,3732	89,1566	88,8756	88,8756	88,4977	88,0876
Mode36	91,1790	91,1854	91,1902	91,1829	91,1911	91,1746	91,1932	91,1932	91,1879	91,1624
Mode37	91,1812	91,1875	91,1931	91,1914	91,1943	91,1789	91,2038	91,2038	91,2073	91,1697
Mode38	99,7846	99,9089	100,0000	99,8895	100,2140	99,9876	99,8077	99,8077	99,7972	99,3100
Mode39	105,9600	106,1320	106,1680	106,0740	106,1290	104,8500	104,3900	104,3900	103,3640	102,5180
Mode40	106,9310	106,9450	106,8850	106,7560	106,3810	105,7480	105,1080	105,1080	104,2180	103,1640

Vamos a mostrar en un gráfico la variación de la frecuencia con respecto a los modos de vibración de la grieta circunferencial, (Profundidad 50%).

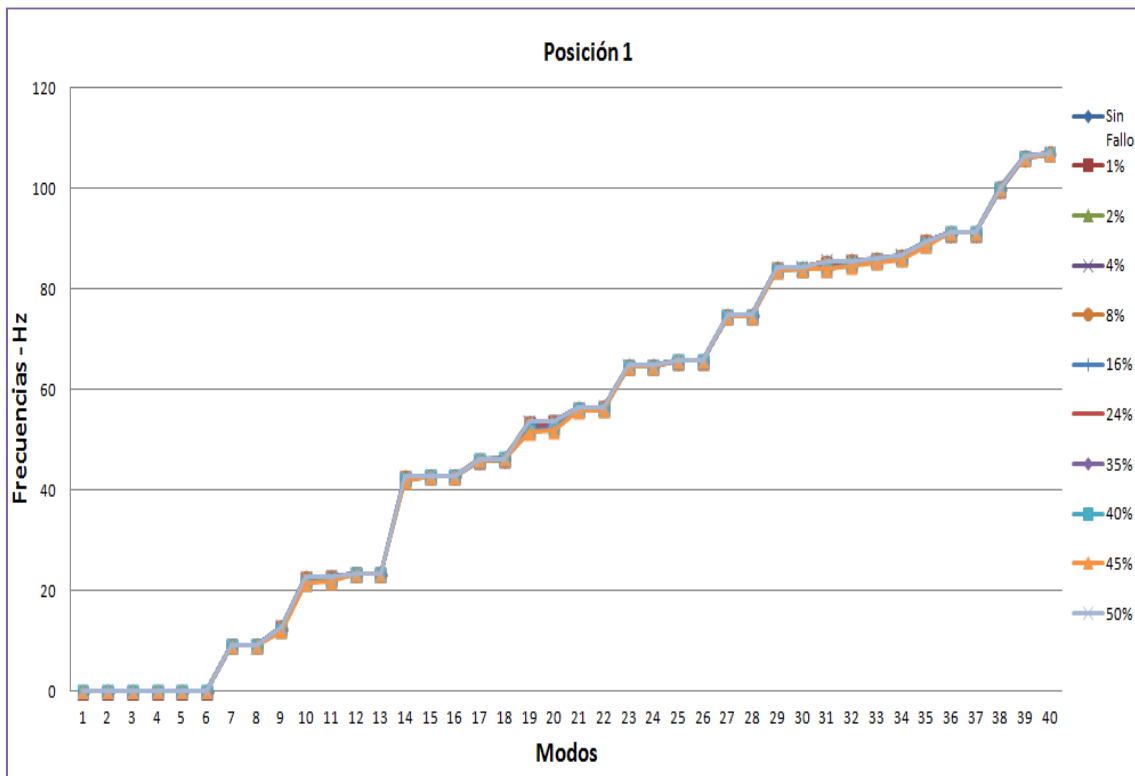


Figura 10.8. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 1', Profundidad 50%.

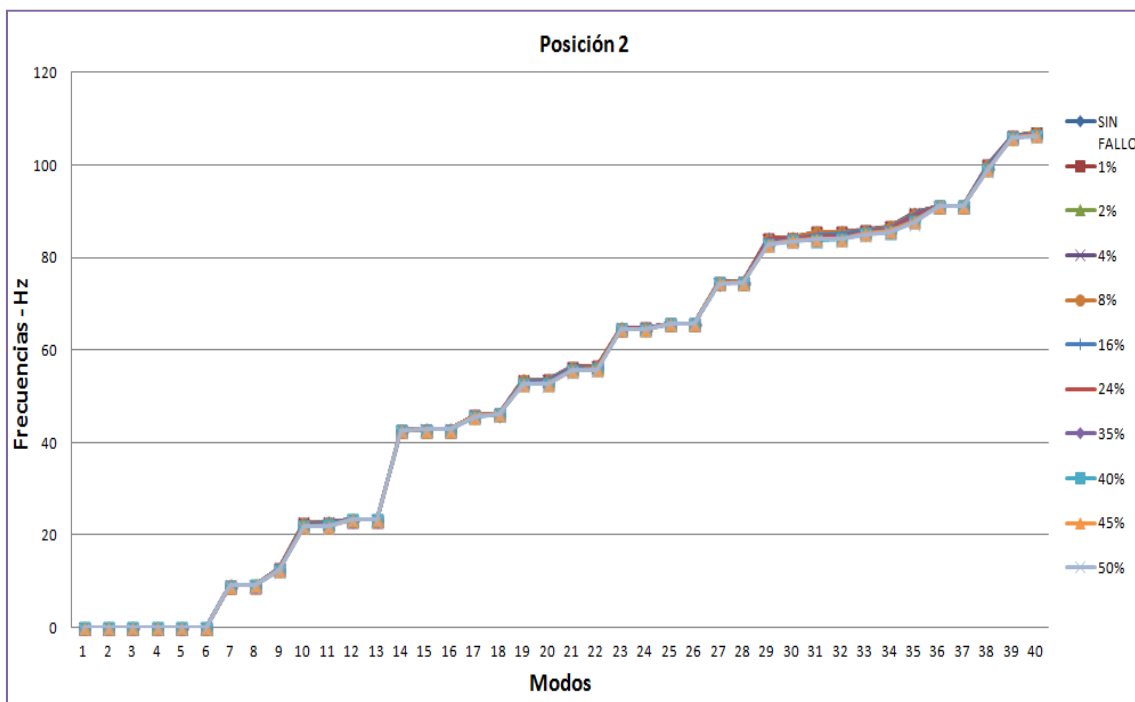


Figura 10.9. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 2', Profundidad 50%.

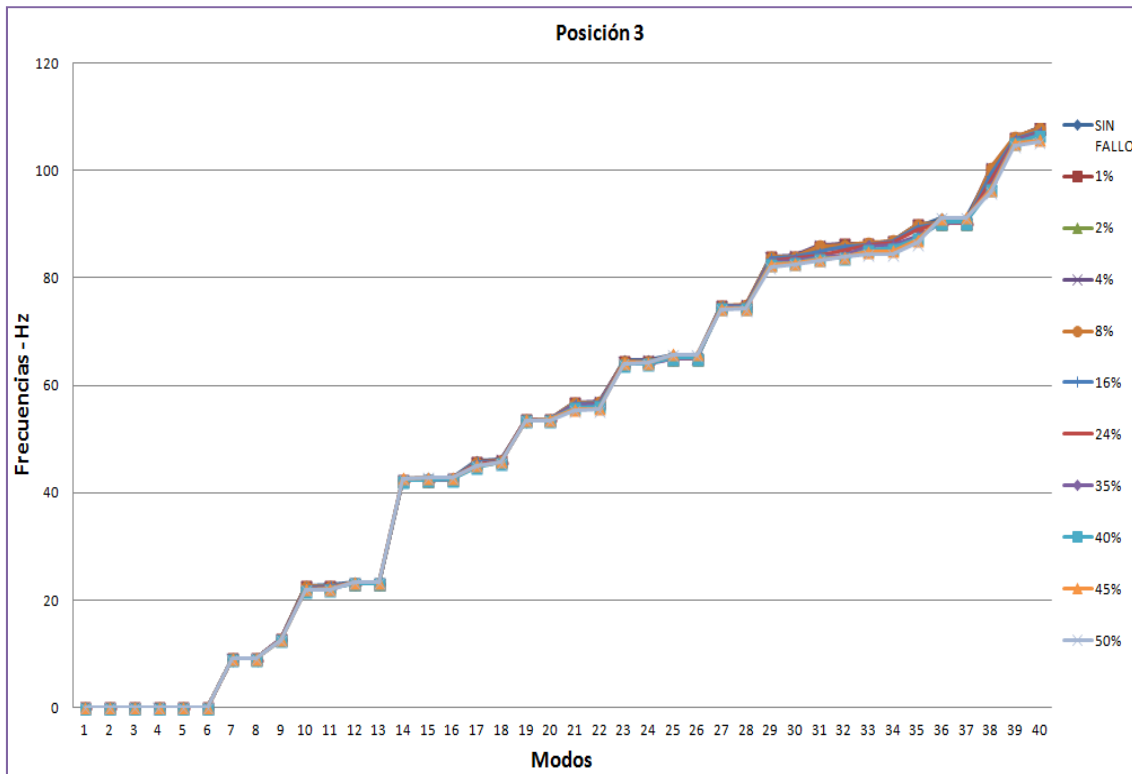


Figura 10.10. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 3', Profundidad 50%.

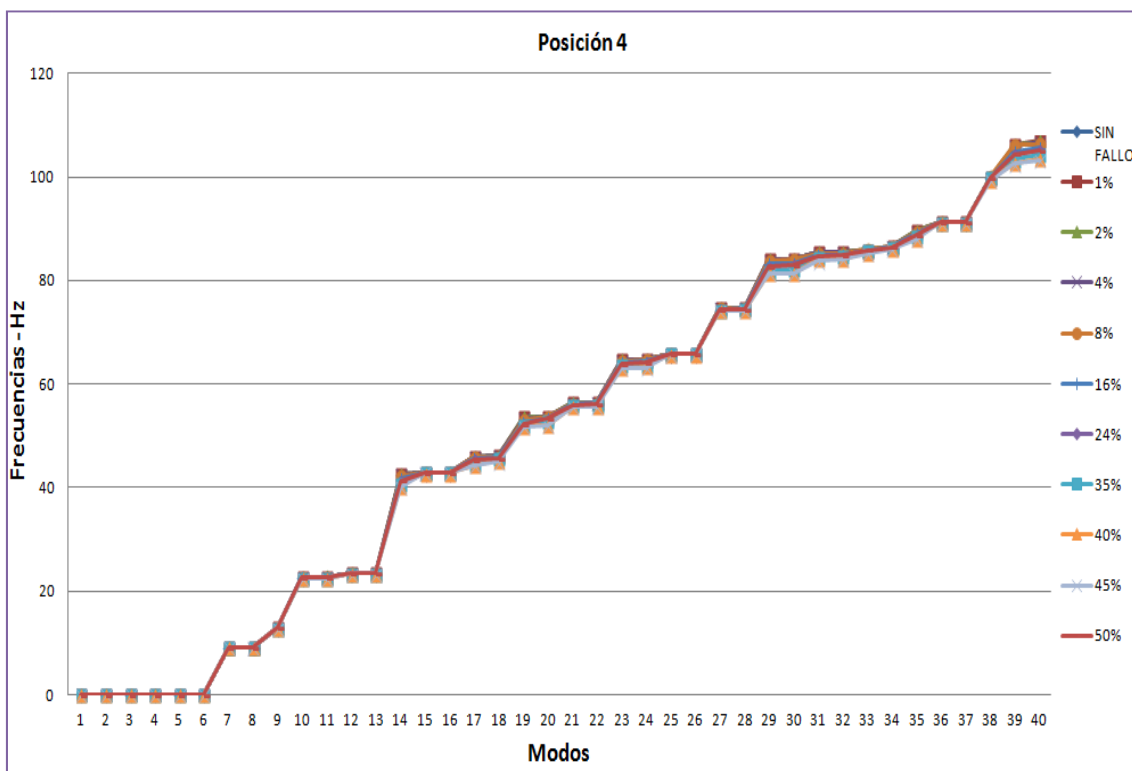


Figura 10.11. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 4', Profundidad 50%.

10.4.2.1. DIFERENCIAS UNITARIAS EN LA GRIETA CIRCUNFERENCIAL (50%)

Tabla 10.25. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 1', Profundidad 50%.

Posición 1, Profundidad 50%												
	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%		
Mode7	-0,0029	0,0005	-0,0033	-0,0018	0,0152	0,0294	0,0680	0,0857	0,0951	-0,0048		
Mode8	-0,0019	0,0007	0,0017	0,0063	0,0194	0,0429	0,0494	0,0550	0,0625	-0,0043		
Mode9	-0,0087	0,0176	0,0151	0,0581	0,1912	0,3765	0,6366	0,7509	0,8433	-0,0099		
Mode10	-0,0275	0,0049	-0,0338	0,0429	0,3790	0,7183	1,0194	1,1006	1,1192	-0,0324		
Mode11	0,0036	0,0295	0,0479	0,0726	0,0864	0,2186	0,5383	0,7345	0,9370	-0,0237		
Mode12	-0,0020	0,0003	-0,0025	-0,0046	-0,0019	0,0064	0,0090	0,0129	0,0165	-0,0045		
Mode13	-0,0027	-0,0020	-0,0016	-0,0033	-0,0028	0,0040	0,0084	0,0143	0,0178	-0,0060		
Mode14	-0,0258	-0,0104	-0,0134	0,0019	0,1586	0,3401	0,5754	0,6538	0,7610	-0,0489		
Mode15	-0,0018	-0,0022	-0,0026	-0,0077	-0,0082	0,0004	-0,0010	0,0009	0,0015	-0,0064		
Mode16	-0,0016	-0,0017	-0,0026	-0,0062	-0,0083	-0,0022	-0,0007	0,0010	0,0009	-0,0064		
Mode17	-0,0291	-0,0351	-0,0700	-0,0793	-0,0854	-0,0737	-0,0363	-0,0331	-0,0254	-0,0914		
Mode18	-0,0146	-0,0452	-0,0423	-0,1141	-0,0644	-0,0421	-0,0299	-0,0344	-0,0172	-0,0484		
Mode19	-0,0684	-0,0310	-0,0393	0,1487	0,8076	1,3008	1,7375	1,8321	1,8913	-0,0749		
Mode20	-0,0073	0,0860	0,0938	0,0812	0,0774	0,3913	1,0282	1,3981	1,7789	-0,0320		
Mode21	0,0132	0,0167	0,0224	0,1106	0,2633	0,2933	0,3451	0,4397	0,5425	-0,0420		
Mode22	-0,0154	-0,0193	-0,0515	-0,0481	0,0278	0,1910	0,4182	0,5158	0,5654	-0,0517		
Mode23	-0,0317	-0,0223	-0,0908	-0,1132	-0,0682	-0,0287	0,0606	0,0660	0,1057	-0,0961		
Mode24	-0,0576	-0,0965	-0,0733	-0,1576	-0,0608	-0,0296	0,0512	0,1008	0,1438	-0,1437		
Mode25	-0,0003	-0,0053	-0,0040	-0,0100	-0,0145	-0,0117	-0,0073	-0,0062	-0,0079	-0,0073		
Mode26	-0,0001	-0,0021	-0,0015	-0,0107	-0,0177	-0,0033	-0,0043	-0,0055	-0,0076	-0,0098		
Mode27	-0,0006	-0,0056	-0,0190	0,0074	0,0538	0,0925	0,1403	0,1686	0,1717	-0,0366		
Mode28	-0,0039	-0,0131	-0,0360	-0,0365	-0,0169	0,0140	0,0493	0,1137	0,1509	-0,0329		
Mode29	-0,0667	-0,0722	-0,1266	-0,1979	-0,1066	-0,0673	0,1434	0,3603	0,4688	-0,1548		
Mode30	-0,0599	-0,0895	-0,1237	-0,2104	-0,1588	-0,0851	0,0519	0,1325	0,2120	-0,2231		
Mode31	-0,0209	-0,0215	-0,0855	-0,0594	0,1378	0,4711	1,3759	1,4634	1,4922	-0,1089		
Mode32	-0,0171	-0,0283	-0,0900	-0,0297	0,0799	0,4528	0,6173	0,7921	0,9023	-0,1022		
Mode33	-0,0632	0,0152	-0,0844	-0,0666	0,0301	0,3342	0,4141	0,5162	0,5840	-0,0951		
Mode34	-0,0271	0,0219	0,0509	0,1448	0,3320	0,5682	0,6231	0,6334	0,7293	-0,0972		
Mode35	-0,0062	0,0051	0,0019	0,0386	0,1360	0,3020	0,5962	0,7415	0,8730	-0,0217		
Mode36	0,0049	-0,0033	0,0001	-0,0171	-0,0245	-0,0099	-0,0097	-0,0041	-0,0148	-0,0132		
Mode37	0,0001	-0,0130	-0,0050	-0,0159	-0,0359	-0,0243	-0,0086	-0,0222	-0,0220	-0,0130		
Mode38	-0,1732	-0,0522	-0,2108	-0,3914	-0,4214	-0,2054	-0,1474	-0,2794	-0,2016	-0,3174		
Mode39	-0,1300	-0,1450	-0,2220	-0,3360	-0,2850	-0,2600	-0,0950	-0,0690	0,0190	-0,3480		
Mode40	-0,0210	-0,0370	-0,0920	-0,0660	-0,0010	0,0810	0,1300	0,1910	0,2010	-0,0990		

Tabla 10.26. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 2', Profundidad 50%.

Posición 2, Profundidad 50%											
	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%	
Mode7	-0,0040	-0,0034	-0,0015	-0,0024	0,0093	0,0234	0,0443	0,0633	0,0643	0,0695	
Mode8	-0,0038	-0,0038	-0,0029	-0,0039	0,0085	0,0212	0,0353	0,0427	0,0444	0,0531	
Mode9	-0,0101	-0,0072	0,0004	0,0084	0,0775	0,1830	0,3124	0,4183	0,4278	0,4825	
Mode10	-0,0261	-0,0361	-0,0369	-0,0138	0,2214	0,4717	0,6899	0,8499	0,8150	0,8383	
Mode11	-0,0283	-0,0130	0,0148	0,0487	0,0771	0,2039	0,4344	0,6455	0,7087	0,9070	
Mode12	-0,0041	-0,0029	-0,0018	-0,0048	0,0010	0,0041	0,0116	0,0156	0,0176	0,0216	
Mode13	-0,0043	-0,0032	-0,0047	-0,0065	-0,0002	0,0053	0,0105	0,0172	0,0153	0,0196	
Mode14	-0,0411	-0,0502	-0,0400	-0,0548	-0,0327	0,0024	0,0226	0,0826	0,0488	0,0715	
Mode15	-0,0046	-0,0032	-0,0042	-0,0062	-0,0018	0,0004	0,0027	0,0080	0,0041	0,0050	
Mode16	-0,0065	-0,0032	-0,0046	-0,0094	-0,0027	0,0014	0,0026	0,0073	0,0056	0,0063	
Mode17	-0,0811	-0,0968	-0,0508	-0,0614	-0,0471	0,0206	0,0856	0,1723	0,1471	0,1689	
Mode18	-0,0421	-0,0544	-0,0636	-0,0022	0,0083	0,0506	0,0499	0,0843	0,0463	0,0715	
Mode19	-0,0615	-0,0718	-0,0678	-0,0825	0,1518	0,4068	0,6489	0,8824	0,8354	0,8956	
Mode20	-0,0386	-0,0116	0,0155	0,0197	0,0861	0,2840	0,5578	0,8236	0,8558	1,0270	
Mode21	-0,0497	-0,0241	0,0344	0,1351	0,2366	0,3395	0,4364	0,5867	0,6777	0,7742	
Mode22	-0,0662	-0,0509	-0,0404	-0,0993	0,0998	0,2868	0,5102	0,5813	0,6401	0,7379	
Mode23	-0,0758	-0,1041	-0,0532	-0,0203	-0,0695	-0,0121	0,0108	0,1004	0,0414	0,0685	
Mode24	-0,1349	-0,0942	-0,1243	-0,0882	-0,0466	0,0178	0,0296	0,1146	0,0639	0,1212	
Mode25	-0,0090	-0,0050	-0,0077	-0,0156	-0,0085	-0,0004	-0,0018	0,0065	0,0006	-0,0057	
Mode26	-0,0093	-0,0025	-0,0063	-0,0065	-0,0054	-0,0022	-0,0019	0,0074	-0,0037	-0,0087	
Mode27	-0,0454	-0,0298	-0,0109	0,0067	0,0610	0,1170	0,2026	0,2422	0,2565	0,2982	
Mode28	-0,0447	-0,0302	-0,0291	-0,0477	0,0442	0,1012	0,1482	0,2165	0,2536	0,2831	
Mode29	-0,1330	-0,1041	-0,1027	-0,0068	-0,0864	0,0529	0,6123	1,1881	1,1661	1,1982	
Mode30	-0,2092	-0,1524	-0,1655	-0,2059	-0,1035	0,0327	0,0577	0,3663	0,4159	0,6172	
Mode31	-0,1413	-0,0861	-0,0718	-0,0556	0,5872	0,9440	1,3827	1,5604	1,4345	1,5142	
Mode32	-0,1362	-0,0971	-0,0851	-0,0591	0,3030	0,9630	1,2636	1,5116	1,4776	1,5101	
Mode33	-0,1621	-0,0610	-0,0613	-0,0857	0,0924	0,3310	0,4874	0,5775	0,6533	0,9149	
Mode34	-0,0969	-0,1113	-0,0220	0,0891	0,3269	0,6096	0,8247	1,0323	0,9465	1,0463	
Mode35	-0,0251	-0,0220	0,0102	0,1203	0,3053	0,6113	1,1522	1,5195	1,6725	2,0903	
Mode36	-0,0142	-0,0036	-0,0077	-0,0123	-0,0094	0,0034	-0,0038	0,0157	-0,0005	-0,0110	
Mode37	-0,0211	-0,0057	-0,0170	-0,0214	-0,0221	-0,0081	-0,0082	0,0106	-0,0148	-0,0464	
Mode38	-0,4164	-0,3254	-0,2824	-0,2544	-0,2138	0,3385	0,5317	0,8152	0,6170	0,7884	
Mode39	-0,3100	-0,1940	-0,2210	-0,3430	-0,2260	-0,1380	-0,0890	0,0840	0,0540	0,0480	
Mode40	-0,1340	-0,0850	-0,0550	-0,0110	0,2070	0,3420	0,4560	0,5770	0,5680	0,7020	

Tabla 10.27. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 3', Profundidad 50%.

Posición 3, Profundidad 50%												
	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%		
Mode7	0,0582	0,0582	0,0549	0,0521	0,0615	0,0707	0,0868	0,0952	0,0421	0,0518		
Mode8	0,0529	0,0529	0,0490	0,0480	0,0627	0,0776	0,0953	0,0992	0,0474	0,0549		
Mode9	0,0354	0,0354	0,0294	0,0199	0,0704	0,1208	0,1936	0,2441	0,2082	0,2470		
Mode10	0,0468	0,0468	0,0252	0,0218	0,2614	0,4682	0,7044	0,8044	0,6947	0,7534		
Mode11	0,0879	0,0879	0,0607	0,0810	0,1606	0,2692	0,4874	0,6767	0,6274	0,8253		
Mode12	0,2482	0,2482	0,2381	0,2450	0,2492	0,2514	0,2660	0,2517	0,0176	0,0241		
Mode13	0,2396	0,2396	0,2374	0,2359	0,2366	0,2384	0,2437	0,2476	0,0189	0,0225		
Mode14	0,3446	0,3446	0,3292	0,3384	0,3328	0,3355	0,3405	0,3231	0,0127	0,0292		
Mode15	0,4564	0,4564	0,4487	0,4526	0,4591	0,4599	0,4509	0,4321	0,0065	0,0112		
Mode16	0,1952	0,1952	0,1325	0,1330	0,1530	0,1828	0,2375	0,2555	0,0080	0,0112		
Mode17	0,1522	0,1522	0,1191	0,0906	0,1866	0,4253	0,8416	1,1266	0,8263	0,9224		
Mode18	0,1678	0,1678	0,0459	0,1994	0,4105	0,4836	0,5386	0,5470	0,3785	0,5755		
Mode19	-0,0775	-0,0775	-0,1197	-0,1810	-0,1277	-0,0388	-0,0121	0,0380	0,0332	0,0490		
Mode20	0,0269	0,0269	-0,0434	-0,0861	-0,0374	-0,0209	0,0924	0,0994	0,1250	0,1475		
Mode21	-0,3967	-0,3967	-0,3933	-0,4863	-0,2665	-0,0169	0,1532	0,4314	0,8547	1,0197		
Mode22	-0,4287	-0,4287	-0,4370	-0,4289	-0,2032	0,0322	0,2340	0,3324	0,8264	0,9721		
Mode23	0,1881	0,1881	0,1004	0,1523	0,3163	0,5354	0,6144	0,7385	0,4666	0,5978		
Mode24	0,1926	0,1926	0,0804	0,1506	0,3037	0,3656	0,6521	0,7257	0,4678	0,5930		
Mode25	0,7160	0,7160	0,7050	0,6981	0,7211	0,7154	0,6966	0,6587	-0,0010	0,0055		
Mode26	0,6807	0,6807	0,6541	0,6847	0,6703	0,6765	0,6758	0,6194	0,0065	0,0110		
Mode27	-0,1516	-0,1516	-0,1443	-0,1888	-0,0819	0,0422	0,1542	0,2877	0,4489	0,5340		
Mode28	-0,1625	-0,1625	-0,1742	-0,2043	-0,0818	0,0429	0,0763	0,1700	0,4093	0,5202		
Mode29	0,1646	0,1646	0,0884	0,0869	0,3505	0,8604	1,0483	1,3361	1,5473	1,9964		
Mode30	0,1093	0,1093	-0,0245	0,0267	0,2340	0,2913	0,7254	1,2702	1,3145	1,6216		
Mode31	-0,5163	-0,5163	-0,5896	-0,5545	0,6209	1,2699	1,5131	1,7499	1,9285	2,1484		
Mode32	-0,7476	-0,7476	-0,7650	-0,6778	-0,2595	0,4086	1,3562	1,7193	1,6085	1,6710		
Mode33	-0,5373	-0,5373	-0,5295	-0,6319	-0,3234	-0,1913	-0,0646	0,6819	0,9320	1,3294		
Mode34	-0,2311	-0,2311	-0,2605	-0,3088	-0,1190	0,0668	0,6264	1,0308	1,6633	2,0965		
Mode35	-0,4654	-0,4654	-0,4677	-0,4075	0,0107	0,6242	1,7539	2,0968	2,4338	3,0091		
Mode36	0,9319	0,9319	0,8932	0,9162	0,9217	0,9599	0,9070	0,7959	0,0003	0,0054		
Mode37	0,8937	0,8937	0,8572	0,8827	0,9117	0,9013	0,8552	0,7743	-0,0083	0,0047		
Mode38	-0,5524	-0,5524	-0,7364	-0,6254	0,5160	1,5619	2,7995	3,3276	3,3966	3,7208		
Mode39	-0,0440	-0,0440	-0,1410	-0,2510	0,0990	0,4090	0,3350	0,7610	0,9800	1,3110		
Mode40	-0,9520	-0,9520	-0,9410	-0,9210	-0,4140	-0,1900	0,0970	0,3950	1,3140	1,6300		

Tabla 10.28. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 4, Profundidad 50%.

Posición 4, Profundidad 50%												
	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%		
Mode7	-0,0020	-0,0029	-0,0019	-0,0013	0,0023	0,0061	0,0061	0,0159	0,0240	0,0259		
Mode8	-0,0018	-0,0016	0,0001	-0,0008	0,0081	0,0119	0,0119	0,0168	0,0218	0,0264		
Mode9	-0,0029	-0,0028	-0,0008	-0,0172	-0,0053	-0,0139	-0,0139	0,0005	0,0039	0,0060		
Mode10	-0,0280	-0,0145	-0,0165	-0,0505	0,0194	0,0741	0,0741	0,1421	0,1765	0,2014		
Mode11	0,0066	0,0040	0,0228	0,0333	0,0824	0,0907	0,0907	0,1971	0,2711	0,2793		
Mode12	-0,0026	-0,0033	-0,0014	-0,0039	-0,0024	-0,0016	-0,0016	-0,0024	0,0018	0,0038		
Mode13	-0,0010	-0,0028	-0,0031	-0,0034	-0,0002	-0,0008	-0,0008	-0,0005	0,0027	0,0056		
Mode14	-0,0125	0,0024	0,0810	0,2438	0,8069	1,3335	1,3335	1,9092	2,3912	2,4808		
Mode15	-0,0023	-0,0043	-0,0047	-0,0067	-0,0056	-0,0091	-0,0091	-0,0132	-0,0117	-0,0110		
Mode16	-0,0023	-0,0046	-0,0028	-0,0070	-0,0050	-0,0083	-0,0083	-0,0146	-0,0118	-0,0092		
Mode17	-0,0382	-0,0580	-0,0221	-0,0291	0,1342	0,5326	0,5326	1,1849	1,5539	1,5486		
Mode18	-0,0157	0,0055	0,0635	0,1527	0,4095	0,4739	0,4739	0,5849	0,9496	1,1826		
Mode19	-0,0714	-0,0554	0,0306	0,2629	0,8777	1,2174	1,2174	1,4294	1,5372	1,6715		
Mode20	0,0430	0,0546	0,1119	0,0520	0,1571	0,3638	0,3638	0,9047	1,5465	1,6939		
Mode21	-0,0085	0,0075	0,0497	0,0714	0,2006	0,3527	0,3527	0,5190	0,6380	0,6776		
Mode22	-0,0381	-0,0321	-0,0081	0,0194	0,1590	0,2385	0,2385	0,4588	0,6697	0,7171		
Mode23	-0,0379	-0,0540	0,0186	0,1258	0,3453	0,7905	0,7905	1,0306	1,5423	1,6299		
Mode24	-0,0532	-0,0362	0,0322	-0,0210	0,3844	0,4818	0,4818	1,0566	1,3812	1,6199		
Mode25	-0,0018	-0,0050	-0,0046	-0,0091	-0,0044	-0,0146	-0,0146	-0,0169	-0,0079	-0,0075		
Mode26	-0,0051	-0,0088	-0,0051	-0,0091	-0,0024	-0,0106	-0,0106	-0,0180	-0,0111	-0,0060		
Mode27	-0,0159	-0,0015	0,0280	0,0402	0,1844	0,2683	0,2683	0,3803	0,5025	0,5578		
Mode28	-0,0126	-0,0132	0,0081	0,0478	0,1563	0,2290	0,2290	0,3937	0,5233	0,5605		
Mode29	-0,0685	-0,0597	0,0652	0,2111	0,7014	1,4169	1,4169	2,2383	2,6683	2,7655		
Mode30	-0,0797	-0,1093	-0,0283	-0,0858	0,7107	1,0175	1,0175	1,8342	2,6040	2,7179		
Mode31	-0,0363	-0,0190	0,0606	0,1384	0,5135	0,6490	0,6490	1,0286	1,3342	1,6951		
Mode32	-0,0579	-0,0360	0,0580	0,1742	0,5082	0,7009	0,7009	0,8580	1,2960	1,4634		
Mode33	-0,0536	-0,0766	-0,0275	-0,1615	-0,0169	0,0051	0,0051	0,1197	0,4387	0,5207		
Mode34	-0,0411	-0,0378	0,0596	0,0076	0,1698	0,2006	0,2006	0,2949	0,4281	0,5862		
Mode35	-0,0015	0,0099	0,0661	0,1431	0,3597	0,6407	0,6407	1,0186	1,3360	1,4287		
Mode36	-0,0064	-0,0112	-0,0039	-0,0121	0,0044	-0,0142	-0,0142	-0,0089	0,0110	0,0166		
Mode37	-0,0063	-0,0119	-0,0102	-0,0131	0,0023	-0,0226	-0,0226	-0,0261	0,0052	0,0115		
Mode38	-0,1243	-0,2154	-0,1049	-0,4294	-0,2030	-0,0231	-0,0231	-0,0126	0,3166	0,4746		
Mode39	-0,1720	-0,2080	-0,1140	-0,1690	1,1100	1,5700	1,5700	2,5960	3,2830	3,4420		
Mode40	-0,0140	0,0460	0,1750	0,5500	1,1830	1,8230	1,8230	2,7130	3,4860	3,7670		

De las tablas anteriores podemos decir que los valores máximos para la diferencia unitaria en la grieta circunferencial se dan en 'Modo 40 y Porcentaje 50% de la posición 4', 'Modo 38 y Porcentaje 50% de la posición 3', 'Modo 39 y Porcentaje 50% de la posición 4', 'Modo 35 y porcentaje 50% de la posición 3', 'Modo 29 y Porcentaje 50% de la posición 4', 'Modo 14 y Porcentaje 50% de la posición 4 con 3,7670Hz, 3,7208Hz, 3,4420Hz, 3,0091Hz, 2,7655Hz, 2,4808Hz respectivamente. Hay que destacar que en la posición 1 para el avance de grieta 50% todos los valores son mayores que los de la rueda sin fallo contradiciendo la teoría y en general los otros resultados obtenidos hasta ahora, pero esto se debe a un fallo de software debido al mallado en la zona de contacto entre la grieta y el agujero del eje, que ocasiona problemas y no permite resolver de forma óptima el análisis modal.

Ahora vamos a ver las diferencias unitarias medias en cada porcentaje de avance de grieta para cada una de las posiciones.

Tabla 10.29 Medias de diferencias unitarias según % y posición, Profundidad 50%.

Posición 1, Profundidad 50%									
1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
-0,0255	-0,0163	-0,0381	-0,0374	0,0416	0,1584	0,3043	0,3653	0,4232	-0,0708
0,1105									
Posición 2, Profundidad 50%									
1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
-0,0762	-0,0573	-0,0461	-0,0339	0,0597	0,1944	0,3209	0,4478	0,4399	0,5082
0,1757									
Posición 3, Profundidad 50%									
1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
0,0214	0,0214	-0,0182	-0,0129	0,1884	0,3732	0,5816	0,7395	0,6952	0,8389
0,3428									
Posición 4, Profundidad 50%									
1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
-0,0284	-0,0281	0,0168	0,0366	0,2631	0,4226	0,4226	0,6710	0,9089	0,9925
0,3678									

Podemos decir según la anterior tabla, que en general a medida que aumenta el avance de grieta aumenta la diferencia unitaria, dándose en las 4 posiciones que el valor máximo para la media de las diferencias está en el 50%. También podemos destacar que la posición 4 es la que tiene una mayor diferencia media. Todo ello concuerda con los resultados obtenidos para profundidad de grieta 25%.

Lo siguiente será presentar las tablas de la diferencia unitaria media para cada modo en cada posición.

Tabla 10.30. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Posición 1 y Profundidad 50%'.

Posición 1, Profundidad 50%		Posición 1, Profundidad 50%	
modo 7	0,0281	modo 24	-0,0323
modo 8	0,0232	modo 25	-0,0075
modo 9	0,2871	modo 26	-0,0063
modo 10	0,4291	modo 27	0,0572
modo 11	0,2645	modo 28	0,0189
modo 12	0,0030	modo 29	0,0180
modo 13	0,0026	modo 30	-0,0554
modo 14	0,2392	modo 31	0,4644
modo 15	-0,0027	modo 32	0,2577
modo 16	-0,0028	modo 33	0,1584
modo 17	-0,0559	modo 34	0,2979
modo 18	-0,0453	modo 35	0,2666
modo 19	0,7504	modo 36	-0,0092
modo 20	0,4896	modo 37	-0,0160
modo 21	0,2005	modo 38	-0,2400
modo 22	0,1532	modo 39	-0,1871
modo 23	-0,0219	modo 40	0,0287

Tabla 10.31 Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Posición 2 y Profundidad 50%'.

Posición 2, Profundidad 50%		Posición 2, Profundidad 50%	
modo 7	0,0263	modo 24	-0,0141
modo 8	0,0191	modo 25	-0,0047
modo 9	0,1893	modo 26	-0,0039
modo 10	0,3773	modo 27	0,1098
modo 11	0,2999	modo 28	0,0895
modo 12	0,0058	modo 29	0,3785
modo 13	0,0049	modo 30	0,0653
modo 14	0,0009	modo 31	0,7068
modo 15	0,0000	modo 32	0,6651
modo 16	-0,0003	modo 33	0,2686
modo 17	0,0257	modo 34	0,4645
modo 18	0,0149	modo 35	0,7435
modo 19	0,3537	modo 36	-0,0043
modo 20	0,3619	modo 37	-0,0154
modo 21	0,3147	modo 38	0,1598
modo 22	0,2599	modo 39	-0,1335
modo 23	-0,0114	modo 40	0,0343

Tabla 10.32. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Posición 3 y Profundidad 50%'.

Posición 3, Profundidad 50%		Posición 3, Profundidad 50%	
modo 7	0,0631	modo 24	0,3724
modo 8	0,0640	modo 25	0,5631
modo 9	0,1204	modo 26	0,5360
modo 10	0,3827	modo 27	0,0749
modo 11	0,3364	modo 28	0,0433
modo 12	0,2040	modo 29	0,7643
modo 13	0,1960	modo 30	0,5678
modo 14	0,2731	modo 31	0,7054
modo 15	0,3634	modo 32	0,3566
modo 16	0,1504	modo 33	0,0128
modo 17	0,4843	modo 34	0,4333
modo 18	0,3515	modo 35	0,8123
modo 19	-0,0514	modo 36	0,7263
modo 20	0,0330	modo 37	0,6966
modo 21	0,0503	modo 38	1,2856
modo 22	0,0471	modo 39	0,3415
modo 23	0,3898	modo 40	-0,0934

Tabla 10.33. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Posición 4 y Profundidad 50%'.

Posición 4, Profundidad 25%		Posición 4, Profundidad 25%	
modo 7	0,0072	modo 24	0,5327
modo 8	0,0093	modo 25	-0,0086
modo 9	-0,0046	modo 26	-0,0087
modo 10	0,0578	modo 27	0,2212
modo 11	0,1078	modo 28	0,2122
modo 12	-0,0014	modo 29	1,1355
modo 13	-0,0004	modo 30	0,9599
modo 14	1,0570	modo 31	0,6013
modo 15	-0,0078	modo 32	0,5666
modo 16	-0,0074	modo 33	0,0753
modo 17	0,5339	modo 34	0,1868
modo 18	0,4280	modo 35	0,5642
modo 19	0,8117	modo 36	-0,0039
modo 20	0,5291	modo 37	-0,0094
modo 21	0,2861	modo 38	-0,0345
modo 22	0,2423	modo 39	1,2908
modo 23	0,6182	modo 40	1,5552

Tabla 10.34. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Profundidad 50%'

Media (Profundidad 50%)		Media (Profundidad 50%)	
modo 7	0,0249	modo 24	0,1717
modo 8	0,0231	modo 25	0,1085
modo 9	0,1184	modo 26	0,1034
modo 10	0,2494	modo 27	0,0926
modo 11	0,2017	modo 28	0,0728
modo 12	0,0423	modo 29	0,4593
modo 13	0,0406	modo 30	0,3075
modo 14	0,3140	modo 31	0,4956
modo 15	0,0706	modo 32	0,3692
modo 16	0,0280	modo 33	0,1030
modo 17	0,1976	modo 34	0,2765
modo 18	0,1498	modo 35	0,4773
modo 19	0,3729	modo 36	0,1418
modo 20	0,2827	modo 37	0,1312
modo 21	0,1703	modo 38	0,2342
modo 22	0,1405	modo 39	0,2623
modo 23	0,1949	modo 40	0,3050

Los modos donde las diferencias medias son mayores son el 31, 35, 29, 19, 32 y 14. Son casi los mismos modos que concluimos con las mayores diferencias unitarias, por lo que parece que serán los modos más a tener en cuenta a la hora de estudiar la rueda.

10.4.3. Resultados para Profundidad de grieta 100%

Tabla 10.35. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 1', Profundidad 100%.

GRIETA CIRCUNFERENCIAL												
SIN FALLO	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%		
Mode7	9,1287	9,1292	9,1295	9,1297	9,1131	9,0221	8,8785	8,4907	8,2537	7,8755	7,5653	
Mode8	9,1433	9,1436	9,1428	9,1351	9,1280	9,1044	9,0605	8,9145	8,8396	8,6763	8,6498	
Mode9	12,8380	12,8310	12,8267	12,7988	12,7078	12,3725	11,9163	10,8644	10,4010	9,8881	9,4910	
Mode10	22,6468	22,6545	22,6588	22,6510	22,3949	21,6908	21,0463	20,2593	20,0573	19,7756	19,4499	
Mode11	22,7596	22,7438	22,7321	22,6849	22,6563	22,5985	22,4346	21,7214	21,3500	20,7909	20,2322	
Mode12	23,3720	23,3729	23,3733	23,3720	23,3669	23,3355	23,2871	23,1940	23,1540	22,8555	22,4832	
Mode13	23,3746	23,3767	23,3766	23,3737	23,3706	23,3551	23,3337	23,2805	23,2620	22,9995	23,2207	
Mode14	42,6381	42,6420	42,6301	42,6310	42,4678	41,5927	38,3654	29,9841	26,8526	24,1682	23,2345	
Mode15	42,7780	42,7809	42,7828	42,7800	42,7801	42,7659	42,7427	42,6474	40,0473	37,1760	34,3060	
Mode16	42,7803	42,7821	42,7829	42,7813	42,7810	42,7669	42,7510	42,7004	41,9804	39,7755	37,8100	
Mode17	45,8893	45,9186	45,9431	45,9763	45,9291	45,4485	44,3833	43,5512	42,6880	42,2190	41,2248	
Mode18	46,1807	46,2017	46,2156	46,2628	46,1169	45,9071	45,5957	43,8090	42,8355	42,2546	42,6462	
Mode19	53,4808	53,5033	53,5061	53,3940	52,9007	51,3278	49,9831	44,0868	43,7187	43,2860	42,6969	
Mode20	53,6526	53,6082	53,5597	53,5485	53,5143	53,1860	50,2257	48,0102	45,6636	43,5389	43,1604	
Mode21	56,3334	56,3432	56,3008	56,0878	55,3988	53,4225	53,0050	48,9465	48,7289	48,3194	47,9132	
Mode22	56,4473	56,4791	56,4906	56,4880	56,4402	55,7739	53,5315	51,2022	50,3036	49,3093	48,5197	
Mode23	64,6425	64,6760	64,7136	64,7579	64,4615	62,9946	60,4826	57,9750	57,1756	56,0515	54,8497	
Mode24	64,7024	64,7654	64,7799	64,7951	64,6623	64,3847	63,2887	60,7596	60,1644	59,6802	59,0839	
Mode25	65,7342	65,7399	65,7428	65,7364	65,7419	65,7312	65,7299	65,2379	62,4099	59,8914	59,6767	
Mode26	65,7599	65,7622	65,7676	65,7650	65,7654	65,7583	65,7545	65,7061	65,7069	64,9537	62,2307	
Mode27	74,6976	74,7179	74,7082	74,6430	74,4237	73,7594	72,2535	65,8403	65,7475	65,0409	65,6805	
Mode28	74,7201	74,7388	74,7452	74,7470	74,7008	74,2521	72,6626	69,0588	68,0274	66,6186	65,6821	
Mode29	84,0329	84,1020	84,1633	84,1777	83,8631	81,8145	74,7651	70,2169	68,9005	67,1521	66,0475	
Mode30	84,0507	84,1546	84,1884	84,2404	84,0765	82,4905	78,8484	77,7606	77,7499	77,3951	74,2269	
Mode31	85,4183	85,4729	85,4663	85,3538	84,9344	83,7188	82,3776	79,8341	78,8022	77,9372	76,0698	
Mode32	85,4999	85,5581	85,5688	85,5553	85,2195	83,8483	82,5978	80,5217	78,8451	78,2131	77,5196	
Mode33	85,8501	85,8792	85,9199	85,9048	85,8799	85,3528	84,1127	81,2735	79,8132	78,5683	77,6026	
Mode34	86,6310	86,6595	86,6538	86,6035	86,1864	85,4537	84,5339	81,7012	81,3255	80,8760	80,4503	
Mode35	89,5163	89,5214	89,5020	89,4204	88,9528	87,6092	85,8614	82,7822	82,4450	81,1730	80,9371	
Mode36	91,1790	91,1805	91,1941	91,1881	91,1937	91,1746	86,2452	85,2839	85,1601	84,7036	83,5930	
Mode37	91,1812	91,1946	91,2038	91,1904	91,2008	91,1849	91,1770	91,1379	90,5650	85,4028	83,6924	
Mode38	99,7846	99,9298	100,1650	100,2740	99,6943	92,8932	91,1843	91,1475	91,1663	89,2267	84,6227	
Mode39	105,9600	106,1440	106,2560	106,2950	106,1420	104,7220	103,5720	97,3211	91,3598	90,1968	91,1328	
Mode40	106,9310	106,9940	106,9980	106,9450	106,6740	105,8850	104,7600	100,7400	95,0675	90,2210	91,1340	

Tabla 10.36. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 2', Profundidad 100%.

	GRIETA CIRCUNFERENCIAL									
	SIN FALLO	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	50%
Mode7	9,1287	9,1302	9,1297	9,1273	9,1169	9,0541	8,8996	8,4568	8,0535	7,6561
Mode8	9,1433	9,1439	9,1453	9,1442	9,1276	9,0943	9,0488	8,9123	8,8183	8,7384
Mode9	12,8380	12,8360	12,8430	12,8372	12,7372	12,4248	11,9154	10,7934	10,1601	9,7594
Mode10	22,6468	22,6687	22,6738	22,6803	22,4353	21,6539	20,7868	19,8213	19,4407	19,2269
Mode11	22,7596	22,7570	22,7508	22,7181	22,6347	22,5259	22,2938	21,4977	20,9366	20,4713
Mode12	23,3720	23,3734	23,3728	23,3713	23,3636	23,3381	23,2809	23,1664	23,0733	22,9091
Mode13	23,3746	23,3752	23,3764	23,3768	23,3682	23,3555	23,3337	23,2727	23,2546	23,2271
Mode14	42,6381	42,6676	42,6692	42,6658	42,5518	41,7937	38,0948	29,3199	25,8616	23,9116
Mode15	42,7780	42,7791	42,7795	42,7798	42,7688	42,7630	42,7362	41,8896	36,2017	34,1493
Mode16	42,7803	42,7818	42,7798	42,7829	42,7741	42,7649	42,7394	42,6050	41,2840	39,0054
Mode17	45,8893	45,9571	45,9201	45,9351	45,9130	45,4447	44,5026	42,6766	41,8320	39,1039
Mode18	46,1807	46,2080	46,2078	46,1935	46,0746	45,8016	45,4570	43,6115	42,6941	42,6454
Mode19	53,4808	53,5300	53,5405	53,5585	53,1424	51,4106	49,2426	44,1352	42,7852	42,7039
Mode20	53,6526	53,6148	53,6525	53,6073	53,4582	53,2729	50,0623	45,1919	44,1084	43,9395
Mode21	56,3334	56,3479	56,2834	56,0861	55,4881	53,6198	52,2779	48,1671	47,9486	47,7933
Mode22	56,4473	56,4794	56,4711	56,4869	56,3772	55,4324	52,9011	50,7874	49,1864	48,2155
Mode23	64,6425	64,6757	64,6791	64,6412	64,4908	63,0922	61,0534	59,6861	59,2057	58,7244
Mode24	64,7024	64,8020	64,7492	64,7776	64,6082	64,3717	63,3798	60,5035	59,7692	59,5642
Mode25	65,7342	65,7359	65,7322	65,7377	65,7212	65,7297	65,7123	65,5350	62,3462	59,8623
Mode26	65,7599	65,7621	65,7596	65,7666	65,7488	65,7569	65,7481	65,6874	65,6795	64,5159
Mode27	74,6976	74,7188	74,6896	74,6254	74,4090	73,7495	70,8515	66,1047	65,6986	63,6816
Mode28	74,7201	74,7434	74,7290	74,7313	74,6619	73,8507	72,2694	67,5696	65,9502	65,6631
Mode29	84,0329	84,0910	84,0586	84,0949	83,8215	81,2674	75,2889	69,3233	68,0197	65,7636
Mode30	84,0507	84,1740	84,1321	84,1237	83,9454	82,0942	78,1640	77,3086	74,3476	73,1849
Mode31	85,4183	85,4745	85,4191	85,2979	84,7127	83,3427	81,1274	77,8165	76,3274	75,0423
Mode32	85,4999	85,5708	85,5376	85,5511	85,0399	83,6698	82,3202	78,5368	77,4388	77,1995
Mode33	85,8501	85,8715	85,8900	85,9812	85,6723	84,6176	83,4248	79,9840	79,1922	78,0871
Mode34	86,6310	86,5861	86,6596	86,6218	85,9503	84,9905	83,5112	80,4566	79,5782	79,3767
Mode35	89,5163	89,5249	89,5155	89,4173	88,8882	87,4995	84,8742	81,2259	80,5967	80,1412
Mode36	91,1790	91,1826	91,1737	91,1845	91,1539	91,1658	85,0631	83,7222	83,5160	81,6181
Mode37	91,1812	91,1837	91,1771	91,1979	91,1579	91,1973	91,1676	91,1001	86,8839	82,9234
Mode38	99,7846	99,9010	99,9383	100,1510	99,3700	92,6230	91,1843	91,1313	91,1613	89,8479
Mode39	105,9600	106,1010	106,0620	106,0780	105,8800	103,5120	102,2880	94,5780	91,2333	91,1522
Mode40	106,9310	107,0010	106,9420	106,8350	106,2990	105,1180	103,4440	98,9922	93,7144	91,1708

Tabla 10.37. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 3', Profundidad 100%.

	GRIETA CIRCUNFERENCIAL									
	SIN FALLO	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	50%
Mode7	9,1287	9,1317	9,1317	9,0734	9,0679	9,0615	8,8916	8,1823	7,0323	6,8780
Mode8	9,1433	9,1456	9,1456	9,0925	9,0901	9,1024	9,0612	8,8347	8,6498	8,6198
Mode9	12,8380	12,8441	12,8441	12,8030	12,7763	12,5434	11,9675	10,5489	9,4502	9,3733
Mode10	22,6468	22,6601	22,6601	22,6053	22,4750	21,5480	20,2812	18,7114	18,1151	18,0571
Mode11	22,7596	22,7736	22,7736	22,6813	22,6147	22,5754	22,2776	21,0828	19,6524	19,4542
Mode12	23,3720	23,3736	23,3736	23,1248	23,1353	23,3423	23,2934	22,9473	22,8525	22,8030
Mode13	23,3746	23,3774	23,3774	23,1401	23,1438	23,3595	23,3328	22,9445	22,9264	23,1062
Mode14	42,6381	42,6800	42,6800	42,3012	42,3123	41,6072	36,8713	28,6179	24,0392	23,6928
Mode15	42,7780	42,7811	42,7811	42,3241	42,3329	42,7447	42,7099	38,8378	31,9106	31,0951
Mode16	42,7803	42,7834	42,7834	42,6043	42,5834	42,7630	42,7134	40,6914	34,5251	33,7788
Mode17	45,8893	45,9538	45,9538	45,7891	45,6863	45,2428	44,7079	41,9630	36,9259	35,9782
Mode18	46,1807	46,2057	46,2057	46,0214	45,8794	45,6587	44,8488	42,2285	42,1214	42,0922
Mode19	53,4808	53,5304	53,5304	53,5658	53,5316	51,1563	47,6339	42,3444	42,1668	42,1093
Mode20	53,6526	53,6820	53,6820	53,6507	53,6151	53,4823	49,3603	44,4923	43,9599	43,7102
Mode21	56,3334	56,3668	56,3668	56,7842	56,5272	53,9631	49,5012	46,2021	44,1380	44,0729
Mode22	56,4473	56,4801	56,4801	56,8858	56,6258	54,0440	53,0562	49,2953	46,1020	46,0509
Mode23	64,6425	64,6776	64,6776	64,4631	64,3445	63,3793	62,4262	59,5795	58,9389	58,3338
Mode24	64,7024	64,8039	64,8039	64,5834	64,4033	64,1316	62,7596	61,7959	59,2187	59,0188
Mode25	65,7342	65,7425	65,7425	65,0268	65,0277	65,6975	65,6604	64,8414	62,6282	61,8504
Mode26	65,7599	65,7644	65,7644	65,0703	65,1013	65,7169	65,6789	64,8971	62,8828	62,0256
Mode27	74,6976	74,7221	74,7221	74,8853	74,6007	71,9677	67,9993	65,4671	64,9405	64,8336
Mode28	74,7201	74,7395	74,7395	74,8944	74,8279	73,5314	71,3538	67,7067	64,9503	64,8700
Mode29	84,0329	84,0973	84,0973	83,8956	83,6859	78,7702	73,9948	68,8729	65,6494	65,3923
Mode30	84,0507	84,1709	84,1709	84,0123	83,9221	80,2408	77,3752	70,1483	67,6585	67,3701
Mode31	85,4183	85,4855	85,4855	85,9881	84,8571	82,6709	79,4132	74,5930	70,9155	70,3315
Mode32	85,4999	85,5687	85,5687	86,3109	85,8978	83,0272	80,8876	74,9309	71,4598	71,2286
Mode33	85,8501	85,9078	85,9078	86,4172	86,1833	83,3229	81,0383	75,7522	72,4609	72,0041
Mode34	86,6310	86,6592	86,6592	86,8126	86,3806	85,1916	81,5102	77,5774	77,4743	77,3608
Mode35	89,5163	89,5306	89,5306	89,9994	89,5980	87,6754	84,5249	79,9393	79,5025	78,7826
Mode36	91,1790	91,1870	91,1870	90,2464	90,2472	91,1197	85,1490	81,4146	80,0447	79,9467
Mode37	91,1812	91,2037	91,2037	90,2481	90,2943	91,1598	91,1195	90,0802	83,5175	82,5652
Mode38	99,7846	99,9429	99,9429	100,4120	99,7192	92,8739	91,1349	90,1262	84,0474	83,4097
Mode39	105,9600	106,1590	106,1590	106,0640	105,9680	101,5080	97,6811	92,1035	88,6090	88,0281
Mode40	106,9310	106,9940	106,9940	107,9030	107,0350	103,5470	101,2580	93,5657	90,1739	90,0003

Tabla 10.38. Frecuencias propias de la rueda con Grieta Circunferencial, 'Posición 4', Profundidad 100%.

	GRIETA CIRCUNFERENCIAL												
	SIN FALLO	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%		
Mode7	9,1287	9,1306	9,1307	9,1308	9,1275	9,0397	8,7887	7,4134	6,3996	5,4494	4,5968		
Mode8	9,1433	9,1451	9,1447	9,1415	9,1301	9,1226	9,0834	8,9275	8,8134	8,6658	8,4757		
Mode9	12,8380	12,8348	12,8398	12,8287	12,7823	12,4037	11,3421	9,6802	9,3803	9,1951	9,0474		
Mode10	22,6468	22,6704	22,6712	22,6600	22,3624	20,4470	17,8480	16,3061	16,1825	16,1324	15,1884		
Mode11	22,7596	22,7441	22,7409	22,6971	22,6773	22,6337	22,3194	20,3157	18,5819	16,7876	15,9605		
Mode12	23,3720	23,3739	23,3747	23,3747	23,3707	23,3558	23,3236	23,1805	22,1166	18,9089	16,1153		
Mode13	23,3746	23,3772	23,3771	23,3763	23,3720	23,3621	23,3354	23,2415	23,1512	22,9986	22,6313		
Mode14	42,6381	42,6347	42,6118	42,4805	41,9559	39,4666	36,5663	27,1934	23,7612	23,3793	23,2646		
Mode15	42,7780	42,7799	42,7820	42,7802	42,7670	42,1162	39,3244	32,0624	29,1305	26,6627	24,4993		
Mode16	42,7803	42,7837	42,7832	42,7845	42,7772	42,7270	40,3848	34,2129	32,6091	31,9800	31,8106		
Mode17	45,8893	45,9506	45,9476	45,9419	45,1816	42,8799	40,5780	35,6729	35,6647	35,1621	33,8680		
Mode18	46,1807	46,1773	46,1366	45,9908	45,8965	45,0986	41,9167	38,5155	37,8728	37,3089	36,8949		
Mode19	53,4808	53,5306	53,5238	53,2898	52,6735	48,7519	42,9219	42,6449	42,4674	41,8603	40,3181		
Mode20	53,6526	53,5689	53,5583	53,5773	53,5527	51,1914	43,1232	42,7162	42,5957	42,4009	41,8851		
Mode21	56,3334	56,3243	56,2384	55,9894	55,3075	51,3805	49,6070	48,4563	46,3015	43,3199	42,5230		
Mode22	56,4473	56,4846	56,4638	56,3620	55,6398	53,4001	52,9343	51,4882	50,3893	49,1345	45,3403		
Mode23	64,6425	64,6725	64,6696	64,4169	63,0651	56,1497	54,0224	53,1220	51,0109	50,2187	48,0684		
Mode24	64,7024	64,7568	64,6955	64,7317	64,5310	62,5785	57,3683	54,1345	54,0916	50,9634	48,3621		
Mode25	65,7342	65,7379	65,7372	65,7321	65,7212	65,1121	63,4863	55,8644	54,2160	51,7678	50,1316		
Mode26	65,7599	65,7614	65,7638	65,7640	65,7316	65,6245	64,9890	61,4742	56,3272	53,5959	52,0473		
Mode27	74,6976	74,7011	74,6391	74,4556	73,8490	66,2663	65,6831	63,0272	57,0629	53,9796	53,8193		
Mode28	74,7201	74,7404	74,7266	74,6614	73,9894	69,0593	65,9631	63,4908	63,2415	62,9464	59,5645		
Mode29	84,0329	84,0713	84,0201	83,7621	80,7299	70,0682	66,2223	65,2044	64,5610	63,2559	62,2406		
Mode30	84,0507	84,1314	84,1210	84,1579	81,4237	76,2611	73,6940	66,1050	65,5535	63,9078	62,3464		
Mode31	85,4183	85,4197	85,2707	84,8094	83,3899	78,0591	74,1927	66,1539	65,7534	65,5369	65,2978		
Mode32	85,4999	85,5462	85,4422	84,8367	83,8623	80,3527	75,6283	69,9195	68,1856	65,9135	65,6029		
Mode33	85,8501	85,8725	85,9440	85,8946	84,8136	83,4189	80,5219	73,7871	72,6995	71,8096	71,2716		
Mode34	86,6310	86,6142	86,5963	86,3484	85,8676	85,1241	82,5064	77,3516	74,0723	72,0950	71,7445		
Mode35	89,5163	89,5028	89,4493	89,2129	88,6321	87,6783	83,4051	78,7977	76,8193	75,9983	73,8971		
Mode36	91,1790	91,1802	91,1801	91,1760	91,1067	88,5614	87,2968	85,2363	83,6564	79,9448	74,9250		
Mode37	91,1812	91,1861	91,1855	91,1819	91,1580	91,0221	90,7886	87,3683	84,4371	80,4440	76,2967		
Mode38	99,7846	99,8887	100,0220	99,6751	94,2217	91,1232	90,9244	90,3173	88,7048	85,2053	81,4024		
Mode39	105,9600	106,1140	106,1170	105,7520	102,2550	97,1216	94,0016	90,5100	88,7617	85,6978	83,9236		
Mode40	106,9310	106,8770	106,6000	106,0250	103,1560	98,3583	95,1488	91,1449	89,5373	88,5602	87,8505		

Como hicimos anteriormente mostraremos en un gráfico la variación de la frecuencia con respecto a los modos de vibración de la grieta circunferencial (Profundidad 100%).

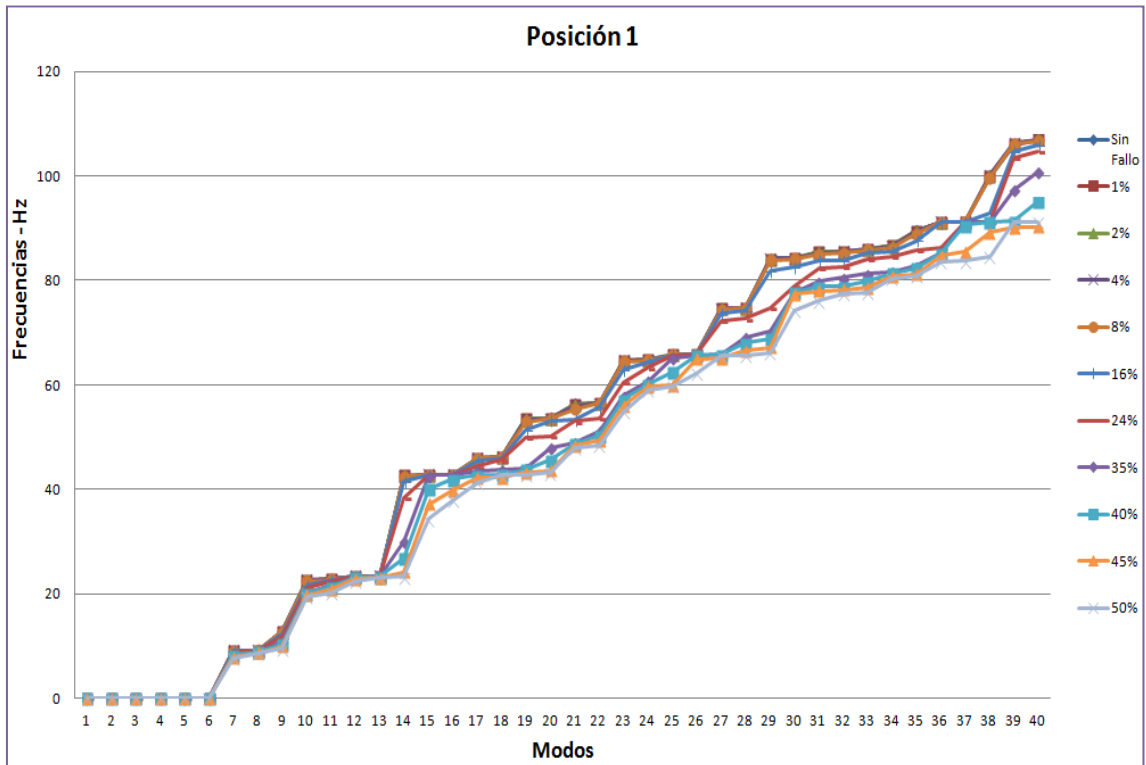


Figura 10.12. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 1', Profundidad 100%.

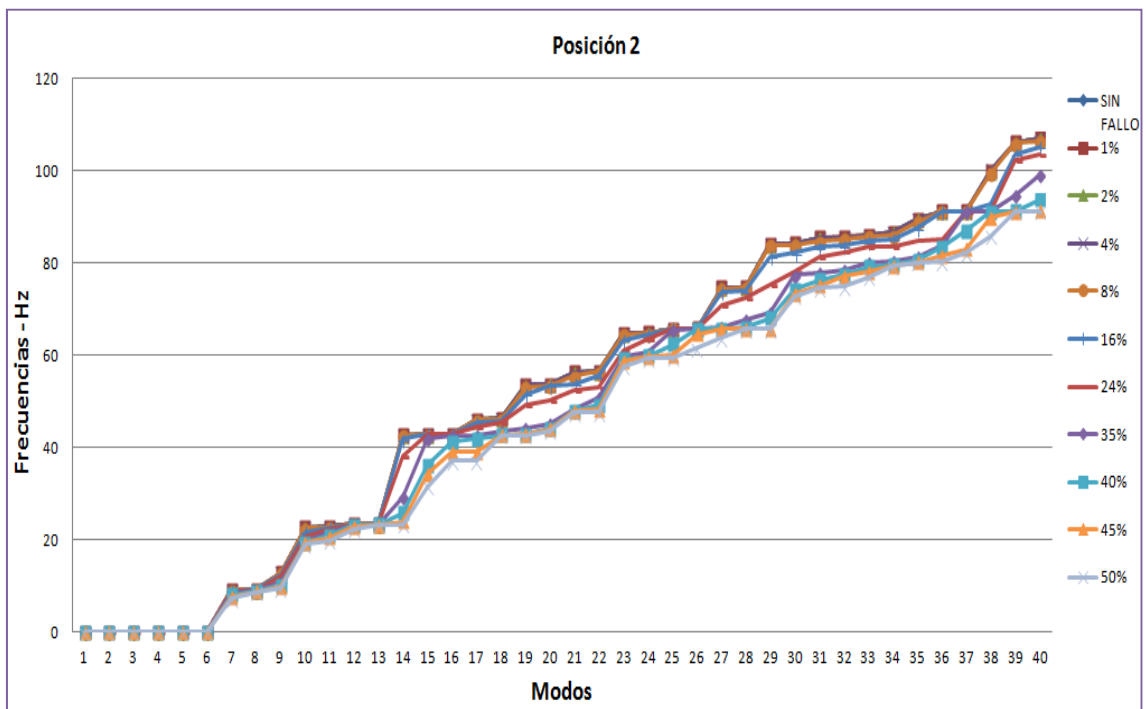


Figura 10.13. Frecuencias vs Modos en la grieta circunferencial, 'Posición 2', Profundidad 100%.

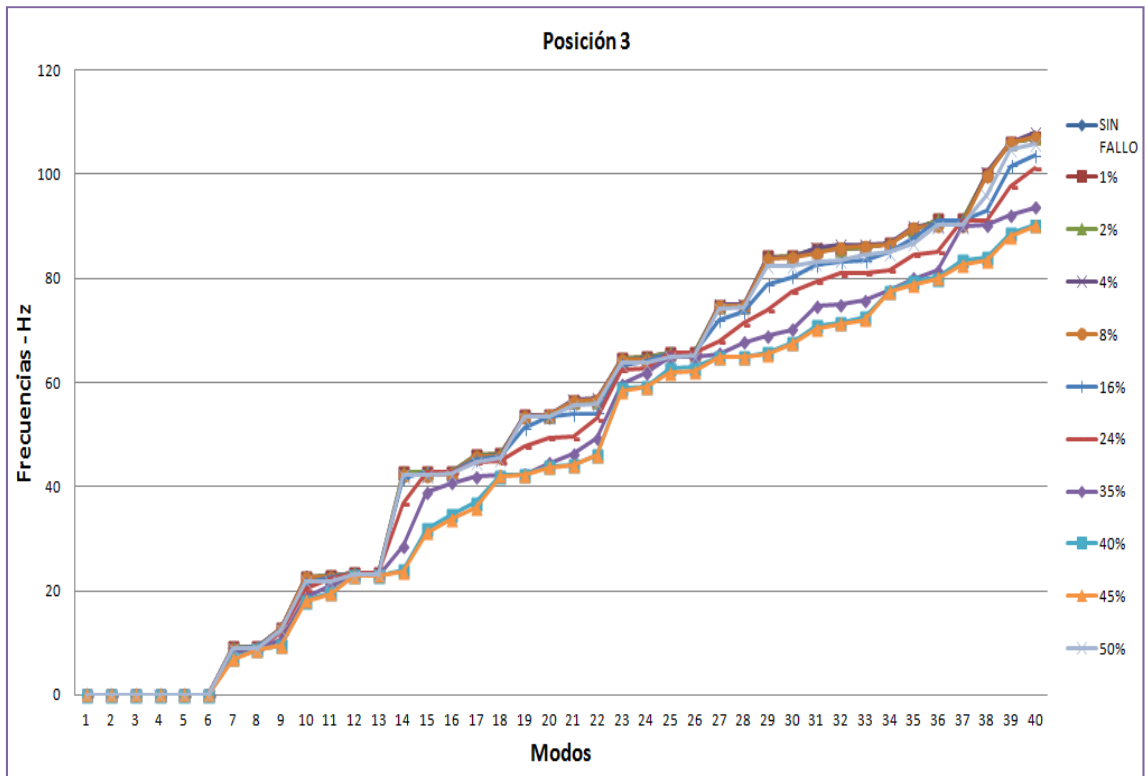


Figura 10.14. Frecuencias vs Modos en la grieta circular, 'Posición 3', Profundidad 100%.

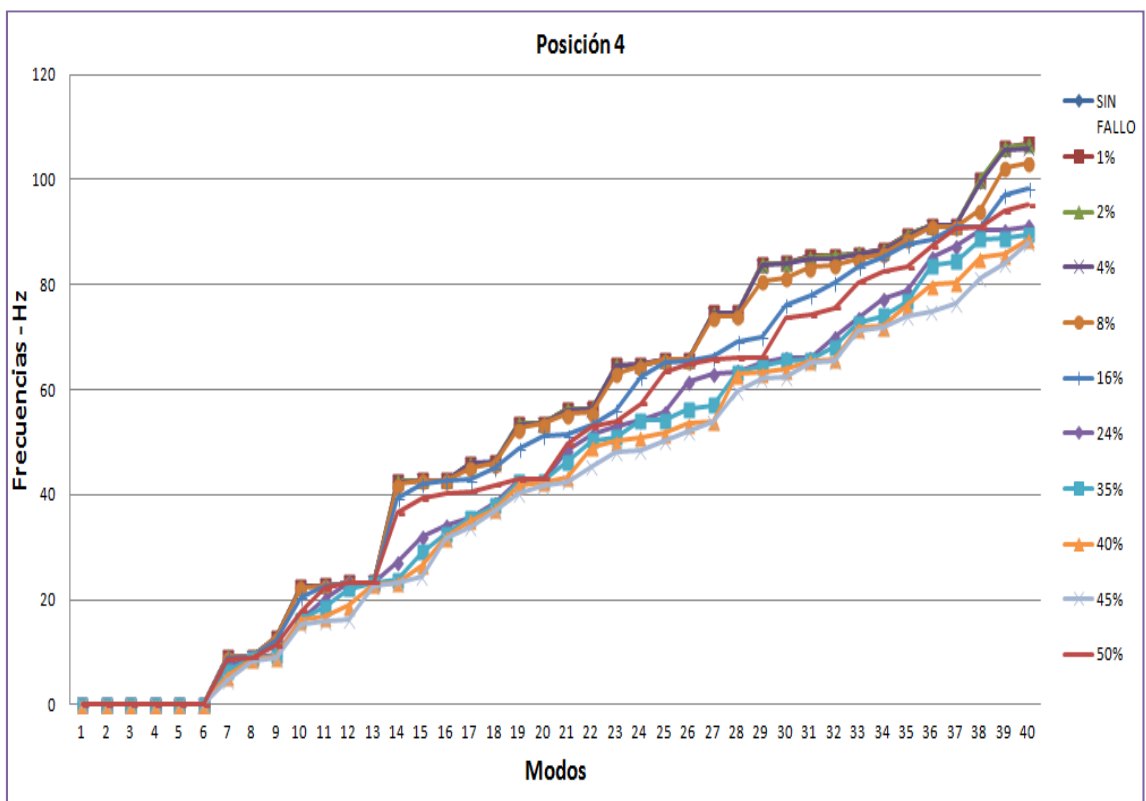


Figura 10.15. Frecuencias vs Modos en la grieta circular, 'Posición 4', Profundidad 100%.

10.4.3.1. DIFERENCIAS UNITARIAS EN LA GRIETA CIRCUNFERENCIAL (100%)

Tabla 10.39. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 1', Profundidad 100%.

Posición 1, Profundidad 100%										
	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
Mode7	-0,0058	-0,0084	-0,0106	0,1710	1,1677	2,7405	6,9894	9,5858	13,7286	17,1263
Mode8	-0,0036	0,0052	0,0896	0,1669	0,4253	0,9048	2,5022	3,3214	5,1076	5,3970
Mode9	0,0545	0,0880	0,3053	1,0142	3,6260	7,1795	15,3731	18,9827	22,9781	26,0714
Mode10	-0,0340	-0,0530	-0,0185	1,1123	4,2213	7,0672	10,5423	11,4343	12,6782	14,1163
Mode11	0,0694	0,1208	0,3282	0,4539	0,7078	1,4280	4,5616	6,1934	8,6500	11,1048
Mode12	-0,0039	-0,0056	0,0000	0,0218	0,1562	0,3633	0,7616	0,9327	2,2099	3,8028
Mode13	-0,0090	-0,0086	0,0039	0,0171	0,0834	0,1750	0,4026	0,4817	1,6047	0,6584
Mode14	-0,0091	0,0188	0,0167	0,3994	2,4518	10,0208	29,6777	37,0221	43,3178	45,5077
Mode15	-0,0068	-0,0112	-0,0047	-0,0049	0,0283	0,0825	0,3053	6,3834	13,0955	19,8046
Mode16	-0,0042	-0,0061	-0,0023	-0,0016	0,0313	0,0685	0,1868	1,8698	7,0238	11,6182
Mode17	-0,0638	-0,1172	-0,1896	-0,0867	0,9606	3,2818	5,0951	6,9761	7,9982	10,1647
Mode18	-0,0455	-0,0756	-0,1778	0,1382	0,5925	1,2668	5,1357	7,2437	8,5016	7,6536
Mode19	-0,0421	-0,0473	0,1623	1,0847	4,0257	6,5401	17,5652	18,2535	19,0625	20,1641
Mode20	0,0828	0,1732	0,1940	0,2578	0,8697	6,3872	10,5165	14,8902	18,8503	19,5558
Mode21	-0,0174	0,0579	0,4360	1,6591	5,1673	5,9084	13,1128	13,4991	14,2260	14,9471
Mode22	-0,0563	-0,0767	-0,0721	0,0126	1,1930	5,1655	9,2920	10,8840	12,6454	14,0443
Mode23	-0,0518	-0,1100	-0,1785	0,2800	2,5493	6,4352	10,3144	11,5511	13,2900	15,1492
Mode24	-0,0974	-0,1198	-0,1433	0,0620	0,4910	2,1849	6,0937	7,0137	7,7620	8,6836
Mode25	-0,0087	-0,0131	-0,0033	-0,0117	0,0046	0,0065	0,7550	5,0572	8,8885	9,2151
Mode26	-0,0035	-0,0117	-0,0078	-0,0084	0,0024	0,0082	0,0818	0,0806	1,2260	5,3668
Mode27	-0,0272	-0,0142	0,0731	0,3667	1,2560	3,2720	11,8575	11,9818	12,9277	12,0715
Mode28	-0,0250	-0,0336	-0,0360	0,0258	0,6263	2,7536	7,5767	8,9570	10,8425	12,0958
Mode29	-0,0822	-0,1552	-0,1723	0,2021	2,6399	11,0288	16,4412	18,0077	20,0883	21,4028
Mode30	-0,1236	-0,1638	-0,2257	-0,0307	1,8563	6,1895	7,4837	7,4964	7,9186	11,6879
Mode31	-0,0639	-0,0562	0,0755	0,5665	1,9896	3,5598	6,5375	7,7455	8,7582	10,9444
Mode32	-0,0681	-0,0806	-0,0648	0,3280	1,9317	3,3943	5,8225	7,7834	8,5226	9,3337
Mode33	-0,0339	-0,0813	-0,0637	-0,0347	0,5793	2,0238	5,3309	7,0319	8,4820	9,6069
Mode34	-0,0329	-0,0263	0,0317	0,5132	1,3590	2,4207	5,6906	6,1243	6,6431	7,1345
Mode35	-0,0057	0,0160	0,1071	0,6295	2,1304	4,0829	7,5228	7,8995	9,3204	9,5840
Mode36	-0,0016	-0,0166	-0,0100	-0,0161	0,0048	5,4111	6,4654	6,6012	7,1019	8,3199
Mode37	-0,0147	-0,0248	-0,0101	-0,0215	-0,0041	0,0046	0,0475	0,6758	6,3373	8,2131
Mode38	-0,1455	-0,3812	-0,4905	0,0905	6,9063	8,6189	8,6557	8,6369	10,5807	15,1946
Mode39	-0,1737	-0,2794	-0,3162	-0,1718	1,1684	2,2537	8,1530	13,7790	14,8766	13,9932
Mode40	-0,0589	-0,0627	-0,0131	0,2403	0,9782	2,0303	5,7897	11,0945	15,6269	14,7731

Tabla 10.40. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 2', Profundidad 100%.

Posición 2, Profundidad 100%											
	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%	
Mode7	-0,0015	-0,0010	0,0014	0,0118	0,0746	0,2291	0,6719	1,0753	1,4726	1,8905	
Mode8	-0,0007	-0,0020	-0,0009	0,0157	0,0490	0,0945	0,2309	0,3250	0,4048	0,4925	
Mode9	0,0020	-0,0050	0,0008	0,1008	0,4132	0,9226	2,0446	2,6779	3,0786	3,4198	
Mode10	-0,0219	-0,0270	-0,0335	0,2115	0,9929	1,8600	2,8255	3,2061	3,4199	3,6994	
Mode11	0,0026	0,0088	0,0415	0,1249	0,2337	0,4658	1,2619	1,8230	2,2883	2,9320	
Mode12	-0,0014	-0,0008	0,0007	0,0084	0,0339	0,0911	0,2056	0,2987	0,4629	1,0245	
Mode13	-0,0006	-0,0018	-0,0022	0,0064	0,0191	0,0409	0,1019	0,1200	0,1475	0,1720	
Mode14	-0,0295	-0,0311	-0,0277	0,0863	0,8444	4,5433	13,3182	16,7765	18,7265	19,3872	
Mode15	-0,0011	-0,0015	-0,0018	0,0092	0,0150	0,0418	0,8884	6,5763	8,6287	11,2475	
Mode16	-0,0015	0,0005	-0,0026	0,0062	0,0154	0,0409	0,1753	1,4963	3,7749	5,7544	
Mode17	-0,0678	-0,0308	-0,0458	-0,0237	0,4446	1,3867	3,2127	4,0573	6,7854	8,7930	
Mode18	-0,0273	-0,0271	-0,0128	0,1061	0,3791	0,7237	2,5692	3,4866	3,5353	3,5616	
Mode19	-0,0492	-0,0597	-0,0777	0,3384	2,0702	4,2382	9,3456	10,6956	10,7769	10,8121	
Mode20	0,0378	0,0001	0,0453	0,1944	0,3797	3,5903	8,4607	9,5442	9,7131	10,0732	
Mode21	-0,0145	0,0500	0,2473	0,8453	2,7136	4,0555	8,1663	8,3848	8,5401	8,8643	
Mode22	-0,0321	-0,0238	-0,0396	0,0701	1,0149	3,5462	5,6599	7,2609	8,2318	8,9283	
Mode23	-0,0332	-0,0366	0,0013	0,1517	1,5503	3,5891	4,9564	5,4368	5,9181	7,0482	
Mode24	-0,0996	-0,0468	-0,0752	0,0942	0,3307	1,3226	4,1989	4,9332	5,1382	5,4420	
Mode25	-0,0017	0,0020	-0,0035	0,0130	0,0045	0,0219	0,1992	3,3880	5,8719	6,2141	
Mode26	-0,0022	0,0003	-0,0067	0,0111	0,0030	0,0118	0,0725	0,0804	1,2440	4,2283	
Mode27	-0,0212	0,0080	0,0722	0,2886	0,9481	3,8461	8,5929	8,9990	9,0568	11,0160	
Mode28	-0,0233	-0,0089	-0,0112	0,0582	0,8694	2,4507	7,1505	8,7699	8,9953	9,0570	
Mode29	-0,0581	-0,0257	-0,0620	0,2114	2,7655	8,7440	14,7096	16,0132	18,2693	18,3369	
Mode30	-0,1233	-0,0814	-0,0730	0,1053	1,9565	5,8867	6,7421	9,7031	10,8658	11,3557	
Mode31	-0,0562	-0,0008	0,1204	0,7056	2,0756	4,2909	7,6018	9,0909	10,3760	10,8670	
Mode32	-0,0709	-0,0377	-0,0512	0,4600	1,8301	3,1797	6,9631	8,0611	8,3004	10,5995	
Mode33	-0,0214	-0,0399	-0,1311	0,1778	1,2325	2,4253	5,8661	6,6579	7,7630	8,9701	
Mode34	0,0449	-0,0286	0,0092	0,6807	1,6405	3,1198	6,1744	7,0528	7,2543	7,4196	
Mode35	-0,0086	0,0008	0,0990	0,6281	2,0168	4,6421	8,2904	8,9196	9,3751	9,4643	
Mode36	-0,0036	0,0053	-0,0055	0,0251	0,0132	6,1159	7,4568	7,6630	9,5609	10,9820	
Mode37	-0,0025	0,0041	-0,0167	0,0233	-0,0161	0,0136	0,0811	4,2973	8,2578	9,1076	
Mode38	-0,1164	-0,1537	-0,3664	0,4146	7,1616	8,6003	8,6533	8,6233	9,9367	13,9691	
Mode39	-0,1410	-0,1020	-0,1180	0,0800	2,4480	3,6720	11,3820	14,7267	14,8078	14,8215	
Mode40	-0,0700	-0,0110	0,0960	0,6320	1,8130	3,4870	7,9388	13,2166	15,7602	15,7822	

Tabla 10.41. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 3', Profundidad 100%.

	Posición 3, Profundidad 100%									
	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
Mode7	-0,0030	-0,0030	0,0553	0,0608	0,0673	0,2371	0,9465	2,0964	2,2507	0,1165
Mode8	-0,0023	-0,0023	0,0507	0,0532	0,0409	0,0821	0,3086	0,4934	0,5235	0,1130
Mode9	-0,0061	-0,0061	0,0350	0,0617	0,2946	0,8705	2,2891	3,3878	3,4647	0,3147
Mode10	-0,0133	-0,0133	0,0415	0,1718	1,0988	2,3656	3,9354	4,5317	4,5897	0,8915
Mode11	-0,0140	-0,0140	0,0783	0,1449	0,1842	0,4820	1,6768	3,1072	3,3054	0,9446
Mode12	-0,0016	-0,0016	0,2472	0,2367	0,0297	0,0786	0,4247	0,5195	0,5690	0,2762
Mode13	-0,0028	-0,0028	0,2345	0,2308	0,0151	0,0418	0,3743	0,4301	0,4482	0,2684
Mode14	-0,0419	-0,0419	0,3369	0,3258	1,0309	5,7668	14,0202	18,5989	18,9453	0,3505
Mode15	-0,0031	-0,0031	0,4539	0,4451	0,0333	0,0681	3,9402	10,8674	11,6829	0,4851
Mode16	-0,0031	-0,0031	0,1760	0,1969	0,0173	0,0669	2,0889	8,2552	9,0015	0,3226
Mode17	-0,0645	-0,0645	0,1002	0,2030	0,6465	1,1814	3,9263	8,9634	9,9111	1,2233
Mode18	-0,0250	-0,0250	0,1593	0,3013	0,5220	1,3319	3,9522	4,0593	4,0885	0,8036
Mode19	-0,0496	-0,0496	-0,0850	-0,0508	2,3245	5,8469	11,1364	11,3140	11,3715	0,1369
Mode20	-0,0294	-0,0294	0,0019	0,0375	0,1703	4,2923	9,1603	9,6927	9,9424	0,2042
Mode21	-0,0334	-0,0334	-0,4508	-0,1938	2,3703	6,8322	10,1313	12,1954	12,2605	0,6843
Mode22	-0,0328	-0,0328	-0,4385	-0,1785	2,4033	3,3911	7,1520	10,3453	10,3964	0,6091
Mode23	-0,0351	-0,0351	0,1794	0,2980	1,2632	2,2163	5,0630	5,7036	6,3087	0,9358
Mode24	-0,1015	-0,1015	0,1190	0,2991	0,5708	1,9428	2,9065	5,4837	5,6836	0,9564
Mode25	-0,0083	-0,0083	0,7074	0,7065	0,0367	0,0738	0,8928	3,1060	3,8838	0,7528
Mode26	-0,0045	-0,0045	0,6896	0,6586	0,0430	0,0810	0,8628	2,8771	3,7343	0,7124
Mode27	-0,0245	-0,0245	-0,1877	0,0969	2,7299	6,5983	9,2305	9,7571	9,8640	0,4608
Mode28	-0,0194	-0,0194	-0,1743	-0,1078	1,1887	3,3663	7,0134	9,7698	9,8501	0,3747
Mode29	-0,0644	-0,0644	0,1373	0,3470	5,2627	10,0381	15,1600	18,3835	18,6406	1,7177
Mode30	-0,1202	-0,1202	0,0384	0,1286	3,8099	6,6755	13,9024	16,3922	16,6806	1,6855
Mode31	-0,0672	-0,0672	-0,5698	0,5612	2,7474	6,0051	10,8253	14,5028	15,0868	2,3203
Mode32	-0,0688	-0,0688	-0,8110	-0,3979	2,4727	4,6123	10,5690	14,0401	14,2713	1,9327
Mode33	-0,0577	-0,0577	-0,5671	-0,3332	2,5272	4,8118	10,0979	13,3892	13,8460	1,3771
Mode34	-0,0282	-0,0282	-0,1816	0,2504	1,4394	5,1208	9,0536	9,1567	9,2702	1,6391
Mode35	-0,0143	-0,0143	-0,4831	-0,0817	1,8409	4,9914	9,5770	10,0138	10,7337	2,7132
Mode36	-0,0080	-0,0080	0,9326	0,9318	0,0593	6,0300	9,7644	11,1343	11,2323	0,9962
Mode37	-0,0225	-0,0225	0,9331	0,8869	0,0214	0,0617	1,1010	7,6637	8,6160	0,9709
Mode38	-0,1583	-0,1583	-0,6274	0,0654	6,9107	8,6497	9,6584	15,7372	16,3749	3,7038
Mode39	-0,1990	-0,1990	-0,1040	-0,0080	4,4520	8,2789	13,8565	17,3510	17,9319	1,1760
Mode40	-0,0630	-0,0630	-0,9720	-0,1040	3,3840	5,6730	13,3653	16,7571	16,9307	1,1280

Tabla 10.42. Diferencias unitarias grieta circunferencial, 'Posición 4', Profundidad 100%.

Posición 3, Profundidad 100%											
	1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%	
Mode7	-0,0030	-0,0030	0,0553	0,0608	0,0673	0,2371	0,9465	2,0964	2,2507	0,1165	
Mode8	-0,0023	-0,0023	0,0507	0,0532	0,0409	0,0821	0,3086	0,4934	0,5235	0,1130	
Mode9	-0,0061	-0,0061	0,0350	0,0617	0,2946	0,3705	2,2891	3,3878	3,4647	0,3147	
Mode10	-0,0133	-0,0133	0,0415	0,1718	1,0988	2,3656	3,9354	4,5317	4,5897	0,8915	
Mode11	-0,0140	-0,0140	0,0783	0,1449	0,1842	0,4820	1,6768	3,1072	3,3054	0,9446	
Mode12	-0,0016	-0,0016	0,2472	0,2367	0,0297	0,0786	0,4247	0,5195	0,5690	0,2762	
Mode13	-0,0028	-0,0028	0,2345	0,2308	0,0151	0,0418	0,3743	0,4301	0,4482	0,2684	
Mode14	-0,0419	-0,0419	0,3369	0,3258	1,0309	5,7668	14,0202	18,5989	18,9453	0,3505	
Mode15	-0,0031	-0,0031	0,4539	0,4451	0,0333	0,0681	3,9402	10,8674	11,6829	0,4851	
Mode16	-0,0031	-0,0031	0,1760	0,1969	0,0173	0,0669	2,0889	8,2552	9,0015	0,3226	
Mode17	-0,0645	-0,0645	0,1002	0,2030	0,6465	1,1814	3,9263	8,9634	9,9111	1,2233	
Mode18	-0,0250	-0,0250	0,1593	0,3013	0,5220	1,3319	3,9522	4,0593	4,0885	0,8036	
Mode19	-0,0496	-0,0496	-0,0850	-0,0508	2,3245	5,8469	11,1364	11,3140	11,3715	0,1369	
Mode20	-0,0294	-0,0294	0,0019	0,0375	0,1703	4,2923	9,1603	9,6927	9,9424	0,2042	
Mode21	-0,0334	-0,0334	-0,4508	-0,1938	2,3703	6,8322	10,1313	12,1954	12,2605	0,6843	
Mode22	-0,0328	-0,0328	-0,4385	-0,1785	2,4033	3,3911	7,1520	10,3453	10,3964	0,6091	
Mode23	-0,0351	-0,0351	0,1794	0,2980	1,2632	2,2163	5,0630	5,7036	6,3087	0,9358	
Mode24	-0,1015	-0,1015	0,1190	0,2991	0,5708	1,9428	2,9065	5,4837	5,6836	0,9564	
Mode25	-0,0083	-0,0083	0,7074	0,7065	0,0367	0,0738	0,8928	3,1060	3,8838	0,7528	
Mode26	-0,0045	-0,0045	0,6896	0,6586	0,0430	0,0810	0,8628	2,8771	3,7343	0,7124	
Mode27	-0,0245	-0,0245	-0,1877	0,0969	2,7299	6,6983	9,2305	9,7571	9,8640	0,4608	
Mode28	-0,0194	-0,0194	-0,1743	-0,1078	1,1887	3,3663	7,0134	9,7698	9,8501	0,3747	
Mode29	-0,0644	-0,0644	0,1373	0,3470	5,2627	10,0381	15,1600	18,3835	18,6406	1,7177	
Mode30	-0,1202	-0,1202	0,0384	0,1286	3,8099	6,6755	13,9024	16,3922	16,6806	1,6855	
Mode31	-0,0672	-0,0672	-0,5698	0,5612	2,7474	6,0051	10,8253	14,5028	15,0868	2,3203	
Mode32	-0,0688	-0,0688	-0,8110	-0,3979	2,4727	4,6123	10,5690	14,0401	14,2713	1,9327	
Mode33	-0,0577	-0,0577	-0,5671	-0,3332	2,5272	4,8118	10,0979	13,3892	13,8460	1,3771	
Mode34	-0,0282	-0,0282	-0,1816	0,2504	1,4394	5,1208	9,0536	9,1567	9,2702	1,6391	
Mode35	-0,0143	-0,0143	-0,4831	-0,0817	1,8409	4,9914	9,5770	10,0138	10,7337	2,7132	
Mode36	-0,0080	-0,0080	0,9326	0,9318	0,0593	6,0300	9,7644	11,1343	11,2323	0,9962	
Mode37	-0,0225	-0,0225	0,9331	0,8869	0,0214	0,0617	1,1010	7,6637	8,6160	0,9709	
Mode38	-0,1583	-0,1583	-0,6274	0,0654	6,9107	8,6497	9,6584	15,7372	16,3749	3,7038	
Mode39	-0,1990	-0,1990	-0,1040	-0,0080	4,4520	8,2789	13,8565	17,3510	17,9319	1,1760	
Mode40	-0,0630	-0,0630	-0,9720	-0,1040	3,3840	5,6730	13,3653	16,7571	16,9307	1,1280	

Los valores máximos para la diferencia unitaria en la grieta circunferencial se dan en 'Modo 7 y Porcentaje 50% de la posición 4', 'Modo 14 y Porcentaje 50% de la posición 1', 'Modo 14 y Porcentaje 50% de la posición 4', 'Modo 15 y porcentaje 50% de la posición 4', 'Modo 10 y Porcentaje 50% de la posición 4', 'Modo 12 y Porcentaje 50% de la posición 4 con 49,6447Hz, 45,5077Hz, 45,4371Hz, 42,7292Hz, 32,9336Hz, 31,0487Hz respectivamente. Como se puede comprobar y la posición 4 es la que más varía con respecto a la rueda sin fallo, y como siempre los valores de avance de grieta máximo (50%), dan las diferencias mayores sin tener en cuenta el mencionado problema con la posición 3. En este caso vemos otro posible error de mallado al darse valores muy bajos en la posición 3 y avance de grieta 50%, que no concuerdan con la línea de los datos. Es similar a lo ocurrido para la posición 1 y avance de grieta 50% con profundidad de grieta 50%.

Ahora vamos a ver las diferencias unitarias medias en cada porcentaje de avance de grieta para cada una de las posiciones.

Tabla 10.43 Medias de diferencias unitarias según % y posición, Profundidad 100%.

Posición 1, Profundidad 100%									
1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
-0,0327	-0,0459	-0,0114	0,2772	1,5346	3,6547	7,4306	9,2786	11,4962	13,0737
4,6656									
Posición 2, Profundidad 100%									
1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
-0,0299	-0,0207	-0,0126	0,2021	1,1275	2,6850	5,1814	6,5717	7,5511	8,4039
3,1660									
Posición 3, Profundidad 100%									
1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
-0,0409	-0,0409	0,0016	0,1837	1,5297	3,4783	6,7166	9,1199	9,4615	0,9793
3,1389									
Posición 4, Profundidad 100%									
1%	2%	4%	8%	16%	24%	35%	40%	45%	50%
-0,0222	0,0080	0,1862	1,2639	5,0668	9,2294	15,4878	18,3426	21,2925	24,1024
9,4957									

En general y como hemos comentado antes, a medida que aumenta el avance de grieta aumenta la diferencia unitaria, dándose en 3 de las 4 posiciones que el valor máximo para la media de las diferencias está en el 50%. También podemos destacar que la posición 4 es la que tiene una mayor diferencia media. Todo ello concuerda con los resultados obtenidos para profundidad de grieta 25% y 50%.

Lo siguiente será presentar las tablas de la diferencia unitaria media para cada modo en cada posición.

Tabla 10.44. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Posición 1 y Profundidad 100%'.

Posición 1, Profundidad 100%		Posición 1, Profundidad 100%	
modo 7	5,1484	modo 24	3,1931
modo 8	1,7916	modo 25	2,3890
modo 9	9,5673	modo 26	0,6734
modo 10	6,1066	modo 27	5,3765
modo 11	3,3618	modo 28	4,2783
modo 12	0,8239	modo 29	8,9401
modo 13	0,3409	modo 30	4,2089
modo 14	16,8424	modo 31	4,0057
modo 15	3,9672	modo 32	3,6903
modo 16	2,0784	modo 33	3,2841
modo 17	3,4019	modo 34	2,9858
modo 18	3,0233	modo 35	4,1287
modo 19	8,6769	modo 36	3,3860
modo 20	7,1778	modo 37	1,5203
modo 21	6,8996	modo 38	5,7666
modo 22	5,3032	modo 39	5,3283
modo 23	5,9229	modo 40	5,0398

Tabla 10.45. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Posición 2 y Profundidad 100%'.

Posición 2, Profundidad 100%		Posición 2, Profundidad 100%	
modo 7	0,5425	modo 24	2,1238
modo 8	0,1609	modo 25	1,5709
modo 9	1,2655	modo 26	0,5643
modo 10	1,6133	modo 27	4,2806
modo 11	0,9182	modo 28	3,7308
modo 12	0,2124	modo 29	7,8904
modo 13	0,0603	modo 30	4,6338
modo 14	7,3594	modo 31	4,5071
modo 15	2,7403	modo 32	3,9234
modo 16	1,1260	modo 33	3,2900
modo 17	2,4512	modo 34	3,3368
modo 18	1,4294	modo 35	4,3428
modo 19	4,8090	modo 36	4,1813
modo 20	4,2039	modo 37	2,1750
modo 21	4,1853	modo 38	5,6722
modo 22	3,4617	modo 39	6,1577
modo 23	2,8582	modo 40	5,0782

Tabla 10.46. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Posición 3 y Profundidad 100%'.

Posición 3, Profundidad 100%		Posición 3, Profundidad 100%	
modo 7	0,5825	modo 24	1,7759
modo 8	0,1661	modo 25	1,0143
modo 9	1,0706	modo 26	0,9650
modo 10	1,7599	modo 27	3,8601
modo 11	0,9895	modo 28	3,1242
modo 12	0,2378	modo 29	6,9558
modo 13	0,2038	modo 30	5,9073
modo 14	5,9292	modo 31	5,1345
modo 15	2,7970	modo 32	4,6552
modo 16	2,0119	modo 33	4,5034
modo 17	2,6026	modo 34	3,5692
modo 18	1,5168	modo 35	3,9277
modo 19	4,1895	modo 36	4,1065
modo 20	3,3443	modo 37	2,0210
modo 21	4,3763	modo 38	6,0156
modo 22	3,3615	modo 39	6,2536
modo 23	2,1898	modo 40	5,6036

Tabla 10.47. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Posición 4 y Profundidad 100%'.

Posición 4, Profundidad 100%		Posición 4, Profundidad 100%	
modo 7	14,3283	modo 24	9,3985
modo 8	1,9499	modo 25	8,1899
modo 9	12,4985	modo 26	6,1618
modo 10	15,0130	modo 27	11,9807
modo 11	8,8480	modo 28	8,6747
modo 12	5,6586	modo 29	13,8271
modo 13	0,6517	modo 30	11,7554
modo 14	19,4818	modo 31	11,7422
modo 15	14,6981	modo 32	10,4923
modo 16	10,0397	modo 33	7,2764
modo 17	11,3416	modo 34	6,6939
modo 18	8,6613	modo 35	6,9004
modo 19	11,7474	modo 36	5,2124
modo 20	10,8767	modo 37	4,0297
modo 21	10,2756	modo 38	7,6526
modo 22	6,5258	modo 39	9,3758
modo 23	11,9130	modo 40	8,9826

Tabla 10.48. Media de las diferencias unitarias para cada modo, 'Profundidad 100%'.

Media (Profundidad 100%)		Media (Profundidad 100%)	
modo 7	4,1203	modo 24	3,2983
modo 8	0,8137	modo 25	2,6328
modo 9	4,8804	modo 26	1,6729
modo 10	4,8986	modo 27	5,0996
modo 11	2,8235	modo 28	3,9616
modo 12	1,3865	modo 29	7,5227
modo 13	0,2513	modo 30	5,3011
modo 14	9,9225	modo 31	5,0779
modo 15	4,8405	modo 32	4,5522
modo 16	3,0512	modo 33	3,6708
modo 17	3,9595	modo 34	3,3171
modo 18	2,9262	modo 35	3,8599
modo 19	5,8846	modo 36	3,3772
modo 20	5,1205	modo 37	1,9492
modo 21	5,1474	modo 38	5,0214
modo 22	3,7304	modo 39	5,4231
modo 23	4,5768	modo 40	4,9408

Los modos donde las diferencias medias son mayores son el 14, 29, 19, 39, 30 y 21. Son casi los mismos modos que concluimos con las mayores diferencias unitarias, por lo que parece que serán los modos más a tener en cuenta a la hora de estudiar la rueda.

10.4.4. Relación Frecuencia – Áreas para la Grieta Circunferencial.

Vamos a relacionar las frecuencias obtenidas en una determinada posición con las áreas de grieta de dicha posición, pudiendo luego mostrar las líneas de tendencia de las frecuencias para cada modo. Con esto podemos definir una línea para cada modo y obtener su R^2 , que determinará si esos modos son muy aproximados a la línea de tendencia o no, y por consiguiente si dichos modos pueden ser fiables o no a la hora de predecir los fallos de la rueda.

En nuestro caso vamos a realizar la relación frecuencia-área para la posición 1.

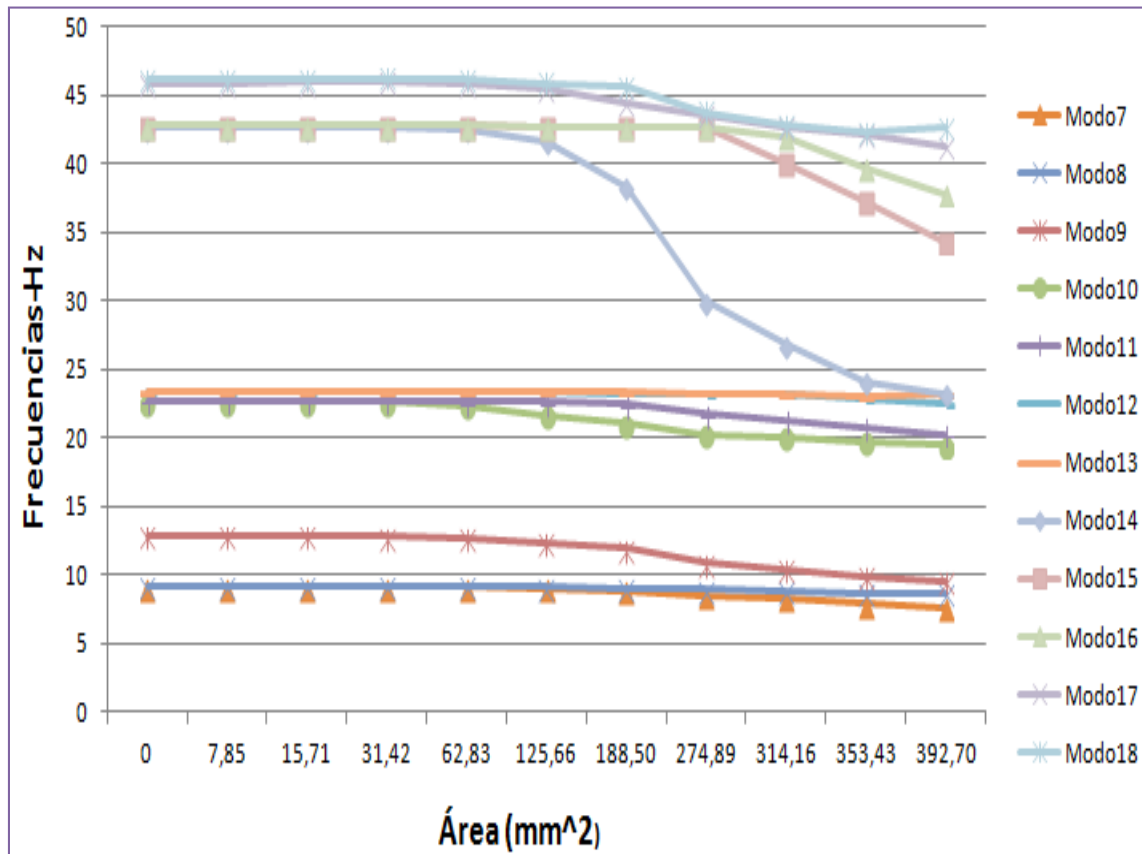


Figura 10.16. Frecuencias-Área para grieta circunferencial, modos 7-18.

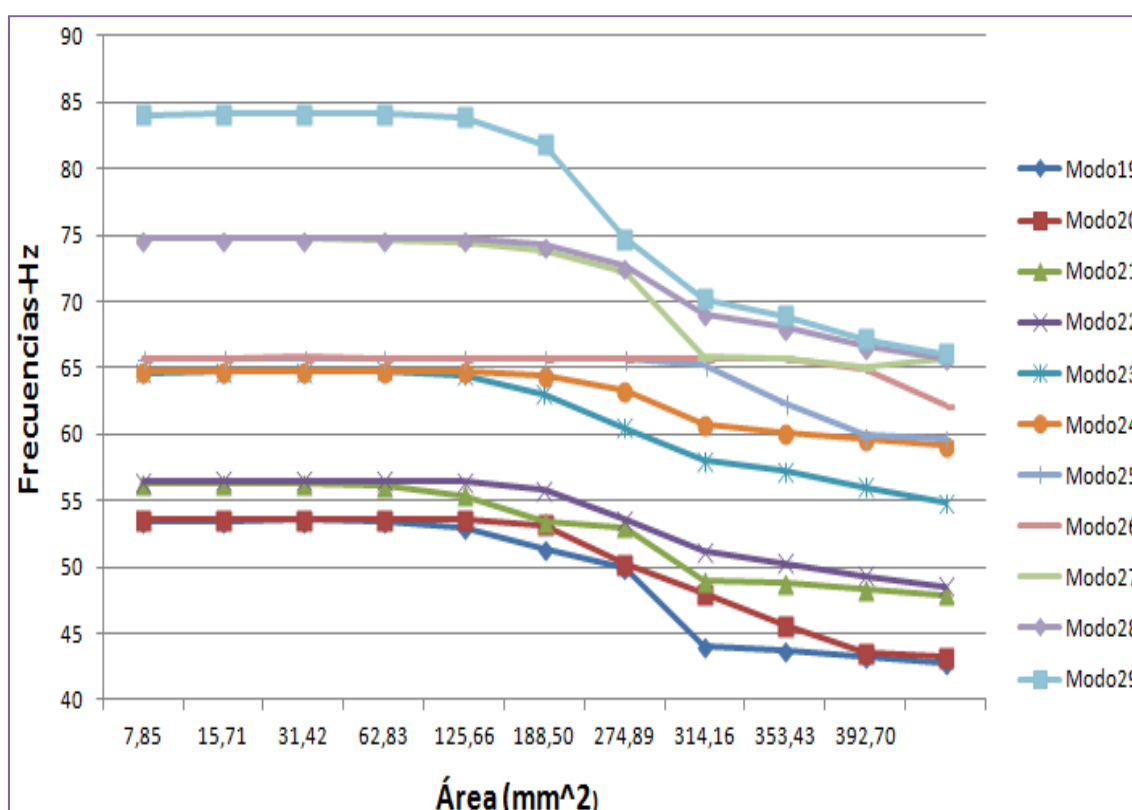


Figura 10.17. Frecuencias-Área para grieta circunferencial, modos 19-29.

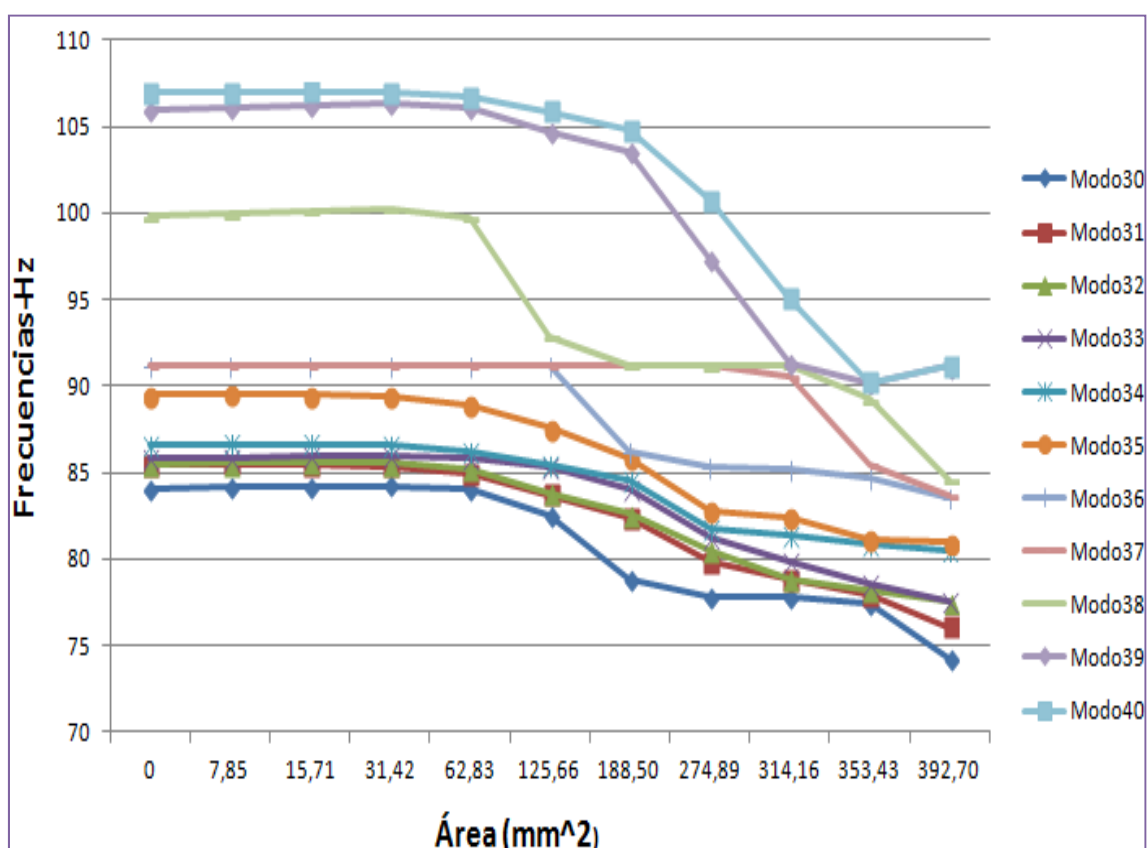


Figura 10.18. Frecuencias-Área para grieta circunferencial, modos 30-40.

A continuación vamos a presentar la línea de tendencia de cada una de los modos de nuestra grieta circunferencial para la posición 1 y profundidad 100%, así como los valores R^2 de las mismas.

Tabla 10.49. 'Funciones' y 'R-cuadrado' de cada modo para 'Posición 1, Profundidad 100%'.

Posición 1, Profundidad 100%		
Modo	Función	R^2
7	$y = -0,1543x + 9,6272$	0,805
8	$y = -0,0523x + 9,3083$	0,812
9	$y = -0,3677x + 13,927$	0,869
10	$y = -0,3767x + 23,65$	0,917
11	$y = -0,2431x + 23,523$	0,797
12	$y = -0,0692x + 23,612$	0,652
13	$y = -0,0259x + 23,457$	0,565
14	$y = -2,2513x + 49,617$	0,823
15	$y = -0,6663x + 45,233$	0,578
16	$y = -0,3589x + 44,125$	0,521
17	$y = -0,4935x + 47,431$	0,857
18	$y = -0,4457x + 47,586$	0,797
19	$y = -1,3244x + 57,209$	0,857
20	$y = -1,189x + 57,286$	0,840
21	$y = -1,0326x + 58,996$	0,898
22	$y = -0,9124x + 59,2$	0,859
23	$y = -1,1238x + 67,905$	0,887
24	$y = -0,652x + 66,736$	0,832
25	$y = -0,5881x + 67,835$	0,637
26	$y = -0,1926x + 66,513$	0,360
27	$y = -1,1859x + 78,162$	0,800
28	$y = -1,0113x + 77,882$	0,829
29	$y = -2,1867x + 90,323$	0,868
30	$y = -1,0333x + 87,034$	0,864
31	$y = -1,0043x + 88,334$	0,893
32	$y = -0,9286x + 88,203$	0,890
33	$y = -0,9076x + 88,732$	0,828
34	$y = -0,7407x + 88,724$	0,876
35	$y = -1,0348x + 92,365$	0,894
36	$y = -0,8972x + 93,756$	0,819
37	$y = -0,5696x + 93,339$	0,493
38	$y = -1,5671x + 103,96$	0,868
39	$y = -1,8466x + 111,91$	0,792
40	$y = -1,7836x + 112,73$	0,778

Esta tabla nos permitirá determinar los modos que podemos considerar más seguros para sacar conclusiones sobre si la rueda presenta fallo o no, y aproximar el tamaño de fallo en caso de existir. Por ejemplo el modo 21 tiene un R^2 de 0,898, lo que indica que si la rueda es analizada y presenta una variación de frecuencias en dicho modo que indica fallo, tenemos una fiabilidad del 89,8% de que el fallo existe y que su área de grieta es la correspondiente a la frecuencia de fallo que presenta.

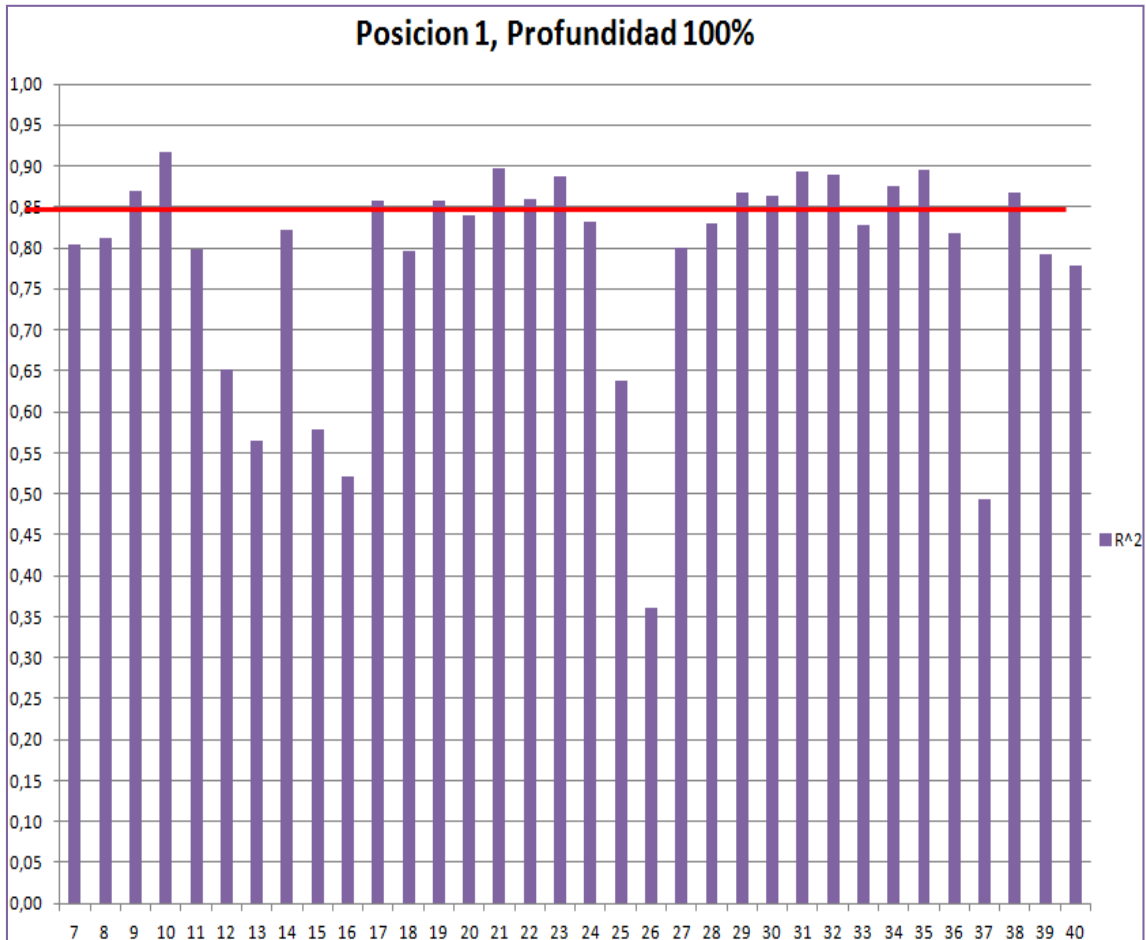


Figura 10.19. 'R-cuadrado' para cada modo en Posición 1 y Profundidad 100%

Del gráfico anterior podemos ver que los modos más fiables y que superan el 85% de fiabilidad son el modo 9, 10, 17, 19, 21, 22, 23, 29, 30, 31, 32, 34, 35 y 38.

A continuación vamos a mostrar otra tabla de líneas de tendencia y su gráfico de R^2 para la posición 4 y profundidad 100% de la grieta circunferencial.

Tabla 10.50. 'Funciones' y 'R-cuadrado' de cada modo para 'Posición 4, Profundidad 100%'.

Posición 4, Profundidad 100%		
Modo	Función	R^2
7	$y = -0,4487x + 10,632$	0,763
8	$y = -0,0611x + 9,3479$	0,755
9	$y = -0,4693x + 14,195$	0,848
10	$y = -0,9103x + 25,018$	0,886
11	$y = -0,6856x + 25,043$	0,753
12	$y = -0,5305x + 25,353$	0,531
13	$y = -0,0565x + 23,575$	0,636
14	$y = -2,4219x + 49,618$	0,848
15	$y = -2,0154x + 49,155$	0,816
16	$y = -1,3466x + 46,955$	0,792
17	$y = -1,4477x + 49,844$	0,887
18	$y = -1,142x + 49,397$	0,860
19	$y = -1,6064x + 57,408$	0,880
20	$y = -1,5323x + 57,541$	0,822
21	$y = -1,5604x + 60,434$	0,927
22	$y = -1,051x + 59,405$	0,887
23	$y = -1,939x + 69,276$	0,920
24	$y = -1,7913x + 69,922$	0,878
25	$y = -1,7312x + 71,227$	0,803
26	$y = -1,4078x + 70,523$	0,740
27	$y = -2,4639x + 81,345$	0,906
28	$y = -1,7071x + 79,07$	0,907
29	$y = -2,7475x + 89,955$	0,887
30	$y = -2,6269x + 90,83$	0,916
31	$y = -2,5927x + 91,856$	0,893
32	$y = -2,435x + 91,955$	0,909
33	$y = -1,7944x + 90,938$	0,867
34	$y = -1,7403x + 91,801$	0,852
35	$y = -1,7824x + 94,595$	0,879
36	$y = -1,4952x + 95,83$	0,823
37	$y = -1,3239x + 95,784$	0,703
38	$y = -1,8783x + 104,11$	0,930
39	$y = -2,5695x + 112,35$	0,945
40	$y = -2,342x + 112,25$	0,940

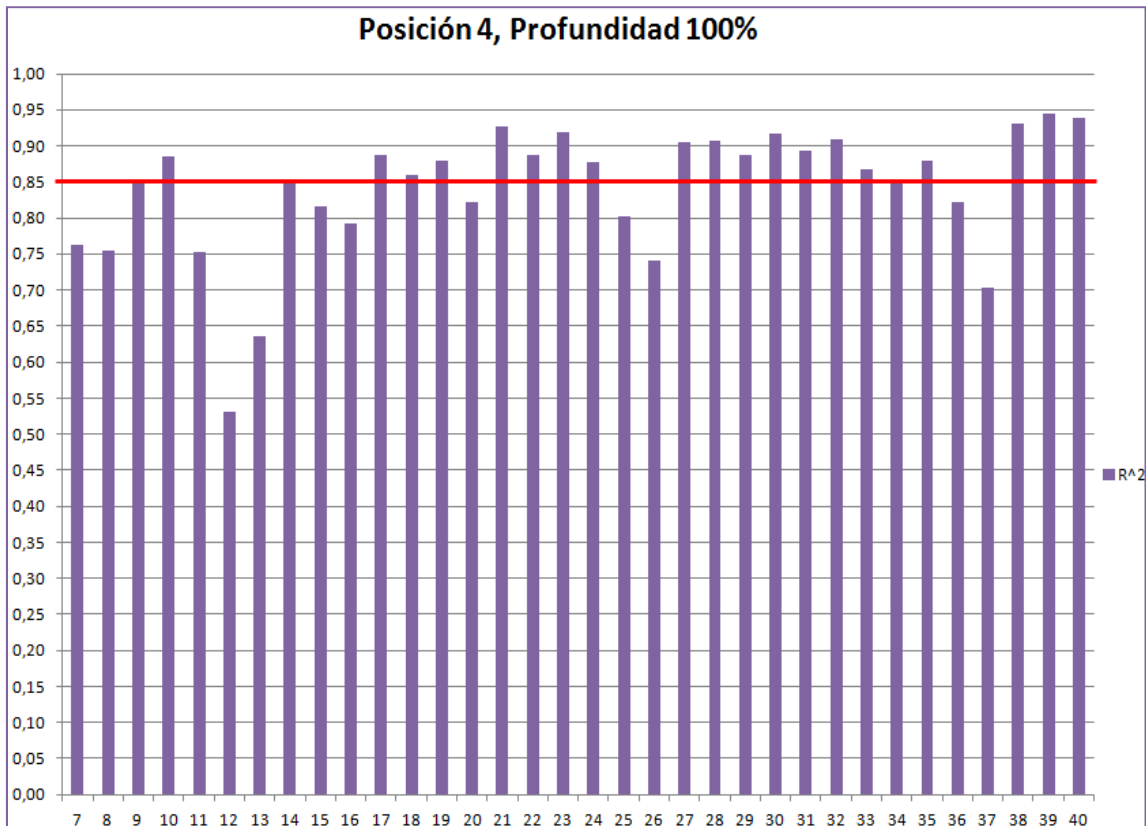


Figura 10.20. 'R-cuadrado' para cada modo en Posición 4 y Profundidad 100%.

A partir de este gráfico determinamos que los modos cuyo R^2 supera el 0,85 y son más fiables son el modo 10, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 38, 39 y 40 y dentro de estos hay 9 que superan el 90% que son el modo 21, 23, 27, 28, 30, 32, 38, 39 y 40. Hay que recordar que en la posición 1 los modos más fiables eran el 9, 10, 17, 19, 21, 22, 23, 29, 30, 31, 32, 34, 35 y 38, coincidiendo casi todos con los modos de la posición 4. Por lo que reafirma nuestra conclusión de que estos son los modos más fiables.

Se podría hacer esto para cada posición y cada profundidad de grieta y así sacar conclusiones sobre fiabilidad de modos, pero debido a la extensión de dicho apartado lo propondremos como unos de los posible trabajos futuros para complementar este estudio.

10.5 LIMITACIONES

Hay que destacar que nuestro software tiene limitaciones a la hora de analizar nuestra rueda. Normalmente esto problemas vienen determinados por problemas de mallado en zonas como bordes, cambios de sección o como en nuestro caso grietas. No todos los análisis y datos obtenidos sigue la teoría de que la rueda con fallo debería tener menores valores en las frecuencias propias o modos de vibración, pues nos hemos encontrado con valores más altos en modos con fallo que en modos sin fallo. A pesar de ello en general hemos visto que se cumple la teoría y aquellos modos en los que no se ha cumplido son valores muy pequeños y achacables a problemas del software para resolver los análisis.

TEMA 11. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

11.1. CONCLUSIONES

Como hemos indicado muchas veces a lo largo de este proyecto el objetivo principal del mismo es el análisis de las variaciones modales de una rueda de ferrocarril con fallo, es decir compara como varia el comportamiento de los modos de vibración de la rueda con fallo con los mismo modos en caso de no existir fallo. En general podemos decir que este objetivo se ha cumplido pues hemos obtenido resultados que concuerdan con la teoría, afianzando aun más nuestros resultados.

Para la realización del proyecto hemos utilizado dos herramientas como son el software Creo/Elements Pro y Microsoft Excel. Creo no ha facilitado una muy buena herramienta para el modelado y análisis de nuestra rueda, mediante los módulos Parametric y Simulate.

Hemos realizado un total de 140 análisis modales, modelando una grieta radial (20 avances de grieta), y una grieta circunferencial para 4 posiciones distintas y en cada posición hemos realizado 30 análisis correspondientes a 10 avances de grieta distintos para 3 profundidades de grieta diferentes (25%, 50% y 100%). El tamaño aproximado de todos los datos supera los 70Gb.

Se puede determinar a tenor de los resultados que es posible estudiar y conocer la integridad estructural de la rueda a partir del análisis de los modos de vibración de la misma, comparándolos con los modos para la rueda sin fallo. Se ha demostrado teórica y experimentalmente que ante fallo los modos vibración son menores debido a la perdida de rigidez de la rueda. Por tanto se puede decir que al comparar los patrones de una rueda nueva a los de una con uso podemos determinar si esta tiene algún tipo de grieta o fallo.

Los resultados obtenidos sigue la línea de investigación implantada por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, y podemos comprobar que son similares a los de otros proyectos anteriormente realizados.

Conclusiones para la grieta radial:

- La diferencia máximas unitarias para la grieta radial se produce en modo 14 para el 100% de avance de grieta, con un valor de 17,4644, en el modo 15 y avance 100% (15,8014), en el modo 19 y avance 100% (15,1919) y en el modo 29 y avance 100% (15,5093).
- En general podemos decir que las diferencias con la rueda sin fallo se incremental al aumentar el tamaño de la grieta radial (avance), algo totalmente apoyado por la teoría.
- En el caso de las diferencias porcentuales para la grieta radial la diferencias máximas se producen en modo 14 para el 100% de avance de grieta, con un valor de 40,95, en el modo 15 y avance 100% (36,94), en el modo 10 y avance 100% (31,39) y en el modo 19 y avance 100% (28,40).
- Los modos más fiables en la grieta radial determinados con el R^2 son el 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 18, 19, 23, 24, 25, 26, 35 y 37. Los valores máximos anteriormente mencionados se encuentran en este grupo de modo de mayor fiabilidad a excepción del modo 29.
- Los modos cuya diferencia media más alta son el 27, 29, 23, 14.

Conclusiones para la grieta circunferencial:

- Los valores diferenciales máximo para la grieta circunferencial y profundidad de grieta 25% se dan en 'Modo 36 y Porcentaje 45% de la posición 3, 'Modo 37 y Porcentaje 16% de la posición 3', 'Modo 40 y Porcentaje 50% de la posición 4', 'Modo 14 y porcentaje 50% de la posición 4, 'Modo 20 y Porcentaje 50% de la posición 1', 'Modo 25 y Porcentaje 45% de la posición 3 con 1,0080Hz, 0,9438Hz, 0,8230Hz, 0,8109Hz, 0,7881Hz, 0,7511Hz respectivamente.
- Las diferencias máximas unitarias para la grieta circunferencial con profundida de grieta 50% se dan en el 'Modo 40 y Porcentaje 50% de la posición 4, 'Modo 38 y Porcentaje 50% de la posición 3', 'Modo 39 y Porcentaje 50% de la posición 4', 'Modo 35 y porcentaje 50% de la posición 3, 'Modo 29 y Porcentaje 50% de la posición 4', 'Modo 14 y Porcentaje 50% de la posición 4 con 3,7670Hz, 3,7208Hz, 3,4420Hz, 3,0091Hz, 2,7655Hz, 2,4808Hz respectivamente.
- Para la grieta circunferencial y profundidad 100% los valores máximos se obtienen en el 'Modo 7 y Porcentaje 50% de la posición 4, 'Modo 14 y Porcentaje 50% de la posición 1', 'Modo 14 y Porcentaje 50% de la posición 4', 'Modo 15 y porcentaje 50% de la posición 4, 'Modo 10 y Porcentaje 50% de la posición 4', 'Modo 12 y Porcentaje 50% de la posición 4 con 49,6447Hz, 45,5077Hz, 45,4371Hz, 42,7292Hz, 32,9336Hz, 31,0487Hz respectivamente.
- Como se ve la profundidad de grieta es un factor muy importante y cuanto mayor es la profundidad mayores son los valores diferenciales, algo que hemos venido diciendo a lo largo del proyecto a ser mayor la grieta.
- Para la grieta circunferencial los modos con mayor fiabilidad son el 10, 17,19, 21, 22, 23, 29, 30, 31, 32 ya que ambos tienen un R^2 superior a 0,85 en las posiciones 1 y 4.
- Comparando los resultados para la grieta radial con la grieta circunferencial vemos que la grieta circunferencial obtiene valores diferenciales mayores, pero hay que indicar que estos se deben a que en la posición 4, que es donde se dan estos máximos, el área de grieta es muy superior a la de la grieta radial. Si comparásemos la grieta radial a la grieta circunferencial en la posición 1, cuyos valores de área de grieta son más similares podíamos decir que los máximos diferenciales son extraordinariamente mayores en la grieta radial, concluyendo que una grieta radial sería más fácil de detectar.

11.2. TRABAJOS FUTUROS

Como hemos comentados en varias ocasiones este proyecto se engloba dentro de la línea de investigación del Departamento de Ingeniería Mecánica, hasta el momento se han realizado muchos trabajos para comprobar la capacidad del programa Creo/Elements Pro a la hora de resolver análisis estáticos y de fatiga. Casi todos los casos se han estudiado para ejes de ferrocarril, desde modelos simple hasta modelos complejos con contactos e incluso ejes huecos para alta velocidad. En mi proyecto se ha estudiado una rueda de ferrocarril, que podría ser un buen punto de partida para seguir con estudios en esta línea.

Como hemos visto este proyecto tiene una amplitud enorme en cuanto al campo de estudio que abarca, habiendo limitaciones de software en ocasiones que no se pudieron salvar, o incluso de espacio o tiempo por la complicación de algunos puntos del proyecto que podrían ser tratados con un proyecto por sí mismo.

Por lo tanto voy a comentar posibles trabajos y líneas de investigación futura que cumplimenten nuestro proyecto y también que encajen en la línea de investigación del Departamento de Ingeniería Mecánica.

- Realizar más estudios de rueda de ferrocarril para comprobar los resultados obtenidos.
- Intentar realizar estudios y mediciones en ruedas de ferrocarril experimentales para comprobar la similitud entre los resultados del software y los reales.
- Realizar los mismos estudios con otro programa elementos finitos para comprobar que los resultados obtenidos son similares.
- Ampliar los estudios de relación frecuencias-área de la grieta que como hemos visto solo hemos realizado un par y se podría hacer para todas las relaciones existentes que son un total de 12.
- Ampliar el estudio de la aproximación de la línea de tendencia con las graficas frecuencia-área de la grieta para conseguir mejores valores de R^2 lo que indicaría que la relación entre la ecuación de la relación y los puntos obtenidos serían más próximos y por lo tanto los modos serían más fiables a la hora de poder detectar el área de la grieta en una rueda con fallo.
- Hacer un estudio más amplio del mallado en ruedas de ferrocarril porque a pesar de tener estudios de sensibilidad en mi proyecto en encontrado algún problema de mallado que podría estudiarse.

La gran posibilidad de trabajos futuros nos pone en perspectiva el presente proyecto que vemos, es una parte de un posible gran estudio y que podría ser cumplimentado con otros proyectos.

TEMA 12. PRESUPUESTO

12.1. INTRODUCCIÓN

La realización del presente proyecto conlleva unos costes que debemos desglosar e imputar a las actividades que se han ido desarrollando durante la realización del mismo. Para poder hacer la imputación de costes primeramente vamos a desglosar las distintas tareas que hemos realizado y el tiempo estimado de duración de las mismas.

1. Comprensión de la ideal inicial y planteamiento de los objetivos y metodología. _____ 10h
2. Documentación y Lectura de estudios previos. _____ 25h
3. Modelado de la rueda. _____ 15h
5. Simulación con Creo Parametrics/Pro. _____ 60h
6. Procesado de los resultados. _____ 60h
7. Obtención de las conclusiones. _____ 20h
8. Redacción de la memoria. _____ 60h

La realización del presente proyecto se ha llevado a cabo entre los meses de Abril y Septiembre, habiendo habido meses con más carga de trabajo que otros. Por supuesto, muchas tareas se han ido realizando solapadamente con otras.

12.2. PRESUPUESTO GENERAL

Una vez identificadas y cuantificadas las tareas necesarias para la realización del proyecto, vamos a identificar los recursos utilizados durante el desarrollo del proyecto.

Coste de Personal: El personal que ha intervenido en la realización del proyecto son Higinio Rubio Alonso como Ingeniero Sénior y tutor del Proyecto, Zoser como Ingeniero y Cotutor del proyecto, y Rubén García Antúnez como Ingeniero estudiante, autor del presente proyecto.

Coste de Equipos: Aquí incluiremos los costes tanto de software como de hardware, incluyendo licencias de Creo Parametrics/Pro y Microsoft Office 2007 y también la amortización del ordenador utilizado.

Otros Costes directos: En este apartado están incluidos las dietas, desplazamientos, costes de oficina y administración.

Costes Indirectos: En este apartado se incluyen aquellos costes difíciles de asignar de forma directa.

Autor:

Rubén García Antúnez

Departamento:

Ingeniería Mecánica

Descripción del proyecto:

Título: Análisis de los modos de vibración de un rueda ferroviaria con grietas

Duración: 6 meses.

Tasa de costes Indirectos: 20%

Presupuesto Total del Proyecto:

22.664,26 €

Desglose del presupuesto:**Tabla 12.1. Presupuesto de Personal.**

PERSONAL				
Apellidos, Nombre	Categoría	Dedicación (h)	Coste unitario (€/h)	Coste (€)
Rubio Alonso, Higinio	Ingeniero Sénior	20	70	1.400
Kalengayi Tshilumbu, Zoser	Ingeniero Sénior	20	70	1.400
García Antúnez, Rubén	Ingeniero estudiante	250	40	10.000
			TOTAL	12.800 €

Tabla 12.2. Presupuesto de Equipos.

EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	Coste (€)	% Uso dedicado al proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de Depreciación (meses)	Coste Imputable (€)
Equipo Informático	1.200	60	6	46	93,91
Licencia Creo Elements/Pro	6.000	60	4	12	1200
Licencia Microsoft Office 2007	120	20	5	12	12,5
				TOTAL	1306,41

Siendo:

Fórmula de la Amortización: $\frac{A}{B} \cdot C \cdot D$

A = Número de meses que el equipo es utilizado.

B = Periodo de depreciación (meses).

C = Coste del equipo.

D = % de uso del equipo dedicado al proyecto.

Tabla 12.3. Presupuesto de Otros Costes Directos.

OTROS COSTES DIRECTOS			
Descripción	Empresa	Coste Imputable (€)	
Material de Oficina e Impresión	Varios	370	
Desplazamientos y Dietas	Varios	510	
		TOTAL	880 €

$$\text{COSTES INDIRECTOS} = 0,2 \cdot \sum \text{Costes Directos} = 0,2 \cdot 16986,41 = 3397,28 \text{ €}$$

Tabla 12.4. Resumen Presupuesto.

RESUMEN DEL PRESUPUESTO	
Descripción	Costes (€)
Personal	12.800
Equipos	1306,41
Otros costes Directos	880
Costes Indirectos	3397,28
Subtotal	18383,69
Impuestos (IVA)	3860,57
Total	22.244,26 €

El presupuesto de este proyecto ha ascendido a la cantidad de 22.664,26 €

Leganés Septiembre 2013

El ingeniero Proyectista

Fdo: Rubén García Antúnez

TEMA 13. BIBLIOGRAFÍA

13.1. BIBLIOGRAFÍA

1. Herrero Garrido, A. "Estudio de la defectología en ruedas ferroviarias". PFC, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
2. Ortega Lester, E. "Simulación del contacto rueda-carril". PFC, Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
3. "Procedure for visual & physical inspection of Wheel of 'on' track machines", Research Designs and Standards Organization, 2012.
4. Brizuela, J.D. "Detección de planos en ruedas de tren por análisis ultrasónico del contacto rueda-carril en condiciones dinámicas". Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 2010.
5. Fernández Matey, S. "Clasificación y Análisis de la Evolución de la Respuesta Modal de un Eje Ferroviario con Grieta". PFC Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
6. Norma UNE-EN 13261: 2009+A1:2011. "Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Requisitos de producto". Septiembre 2011.
7. Manuales para Creo Elements/Pro. PTC University, 2012.
8. Molina Sánchez, B. "Estudio de la creación, desarrollo y método de detección de grietas en ruedas ferroviarias". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2006.
9. Madrid Grande, R. "Estudio de la longitud crítica de fisura en rueda ferroviaria". PFC, Universidad Carlos III de Madrid.
10. "Equipos de detección de fisuras en velo de rueda por ultrasonidos", Proyecto de la empresa NERTUS mantenimiento ferroviario.
11. Relancio Rus, M.A. "Análisis con Pro/Engineer de las variaciones modales de un eje ferroviario ante fallo". PFC, Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
12. L. Jordi, J. Puig, S. Cardona. E. G. Flórez. "Evaluación de la severidad de un plano en la superficie de rodadura de las ruedas de un tren", Universidad Politécnica de Cataluña, 2010.
13. Argüelles Iñiguez, Antonio. Análisis de un eje ferroviario mediante Pro/Engineer. Proyecto fin de carrera. Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, 2012.
14. Lozano Morote, A. "Estudio de ensayos no destructivos en ruedas de ferrocarril". PFC, Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
15. Carrascal, I. Casado, J.A. Diego, S. y Polanco, J.A. "Atenuación frente a impacto en sistemas de sujeción ferroviaria de alta velocidad". Universidad de Cantabria, 2011.
16. Elkin G. Flórez Serrano, Foix S. Cardona, Luisa Jordi Nebot. "Uso de la STFT en el análisis de vibraciones para detectar y caracterizar la presencia de un defecto en la superficie de las ruedas de un tren", 2012.
17. D 6.1 Development of compensated resonance inspection prototype for wheel sets. Project title: "Wheel set integrated design and effective maintenance". (WIDEM), 2008.

18. <http://llogsa.com>, “Tecnología Phased Array” (última visita Septiembre 2013).
19. <http://es.ptc.com>, Manuales de Creo Elements/Pro (última visita Septiembre 2013).
20. Recommendations for Railway Wheelsets, RSSB Approved Code of Practice, Rail Safety and Standards Board Limited.

TEMA 14. ANEXO. PLANO DE LA RUEDA

14.1. PLANO DE LA RUEDA

